



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

**FOTOGRAMMETRICKÉ SNÍMÁNÍ POLOHY JEZDCE
NA MOTOCYKLU**

PHOTOGRAMMETRIC LOCALIZATION OF MOTORCYCLE RIDER

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jiří Lečbých

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Fojtášek, Ph.D.

BRNO 2021

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student: **Bc. Jiří Lečbych**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Automobilní a dopravní inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Jan Fojtášek, Ph.D.**
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Fotogrammetrické snímání polohy jezdce na motocyklu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Fotogrammetrie je běžně používanou technologií pro měření tvarů, určování rozměrů a polohy předmětů v prostoru. V současnosti je uplatňována především pro 3D skenování a s ním spojený reverzní inženýring v laboratorních podmínkách, kde je pevně dána poloha skeneru vůči měřenému předmětu. Novou výzvu představuje měření polohy jezdce a jeho jednotlivých končetin v reálném čase na jedoucím motocyklu. Takto získaná data mohou dále sloužit při návrhu motocyklu například k odladění jeho jízdní dynamiky.

Cíle diplomové práce:

Úkolem této diplomové práce je teoreticky popsat problematiku snímání polohy jezdce na motocyklu v reálném čase pomocí fotogrammetrie. Na základě teoretických poznatků pak sestavit reálný experiment a metodu vyhodnocení polohy jezdce na základě naměřených dat.

Práce bude obsahovat:

Popis základních principů fotogrammetrického měření.

Návrh měřicího zařízení vhodného pro upevnění k motocyklu a snímání polohy jezdce za jízdy v reálném čase.

Experimentální ověření navrženého měřicího řetězce.

Vyhodnocení naměřených dat a určení polohy jezdce v prostoru vůči souřadnému systému spojeném s motorkou.

Seznam doporučené literatury:

LINDER, W. Digital Photogrammetry: Theory and Applications. Berlin: Springer-Verlag, 2013. 191 s. ISBN 978-3-662-06727-7.

LINDER, W. Digital Photogrammetry: A Practical Course. Berlin: Springer-Verlag, 2009. 220 s. ISBN 978-3-540-92724-2.

COSSALTER, V. Motorcycle Dynamics. Morrisville: Lulu.com, 2006. 572 s. ISBN 9781430308614.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá návrhem měřicího zařízení, které by umožňovalo snímat pohyby jezdce během dynamických jízdních stavů, s cílem vytvořit simulaci v multi-body softwaru na základě naměřených dat. V první části práce je věnována pozornost přehledu současného stavu poznání, tj. principům fotogrammetrie, používaným snímačům a vlastnostem motocyklu. Druhá část pojednává o samotné konstrukci měřicího řetězce, realizaci měření, zpracování dat a jejich vyhodnocení v multi-body softwaru.

KLÍČOVÁ SLOVA

Pozice jezdce, fotogrammetrie, dynamika motocyklu, multi-body, simulace

ABSTRACT

This Master's thesis deals with designing a measuring device that would record driver's movements during dynamic riding states known as localization, and based on the recorded data creating a simulation in multi-body software. The first part reviews the current state of knowledge in the field of photogrammetry, sensors, and motorcycles' characteristics. Moreover, the second part focuses on constructing the measuring device, practical aspects of data collection, processing, and evaluation in multi-body software.

KEYWORDS

Rider's localization, photogrammetry, motorcycle's dynamics, multi-body, simulation

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Lečbých, J. *Fotogrammetrické snímání polohy jezdce na motocyklu*. Brno, 2021. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. 71 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jan Fojtášek, Ph.D.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Jana Fojtáška, Ph.D. a s použitím informačních zdrojů uvedených v seznamu.

V Brně dne 21. května 2021

.....

Bc. Jiří Lečbych

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji mému vedoucímu diplomové práce Ing. Janu Fojtáškoví, Ph.D. za odborné vedení, podnětné rady a pomocnou ruku při zpracování diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Luboru Zháňalovi, Ph.D. a Ing. Martinu Tobiášovi za pomoc při realizaci praktické části diplomové práce. V neposlední řadě bych rád poděkoval rodičům a blízkým za podporu během studia na vysoké škole.

OBSAH

Úvod	11
1 Přehled současného stavu poznání.....	12
1.1 Fotogrammetrie.....	12
1.1.1 Princip.....	13
1.1.2 Dělení	16
1.2 Obrazové snímače.....	18
1.2.1 CCD senzory	18
1.2.2 CMOS senzory	19
1.3 3D Skenery	21
1.3.1 Kontaktní skenování.....	21
1.3.2 Bezkontaktní skenování.....	22
1.4 Základní vlastnosti motocyklu.....	23
1.4.1 Dynamické vlastnosti motocyklu	23
1.4.2 Kinematické vlastnosti motocyklu	26
1.5 Atributy jezdce.....	27
1.5.1 Pozice jezdce při jízdách situacích.....	27
1.5.2 Přístup k modelování	29
2 Analýza problému a cíl práce	30
2.1 Analýza problému.....	30
2.2 Cíl práce	30
3 Konstrukční řešení měřicího prototypu	31
3.1 Výchozí stav stroje.....	31
3.2 Snímací zařízení jezdce	32
3.2.1 Přídavný rám	32
3.2.2 Kamerový systém	33
3.2.3 Kalibrace kamer.....	38
3.2.4 Souřadné systémy	43
3.2.5 3D Skenování	45
4 Realizace měření	48
4.1 Ověření přesnosti kamer	48
4.2 Pohyby přilby.....	50
4.3 Areál FSI.....	50
4.4 Brněnské veletržní výstaviště	51
4.5 Laboratoř FSI – pohyb přilby	52
5 Zpracování dat.....	54
5.1 GOM Correlate	54
5.2 Adams	57
6 Diskuze.....	60
6.1 Analýza chyb	60

Závěr	64
Seznam použitých zkratek a symbolů	69
Seznam obrázků	70
Seznam příloh	71

ÚVOD

Jízdní vlastnosti motocyklu jsou do velké míry ovlivněny pohybem jezdce a jeho hmotností. Zatímco v dynamice automobilu představuje hmotnost řidiče pouze zlomek celé sestavy, v případě motocyklu je to přesně naopak. Čím vyšší je poměr hmotnosti jezdce vůči hmotnosti motocyklu, tím výraznější je vliv na chování a jízdní vlastnosti motocyklu. Nejsilnějším faktorem ovládajícím motocykl je tělo jezdce, resp. přesun hmoty jezdce pomocí náklonů do stran. Čím zkušenější jezdec je, tím větší náklon během jízdy provádí, navíc se sportovnější jízdou graduje i dynamika prováděných náklonů. Mnoho literatur uvádí jezdce pouze jako tuhé pevné těleso, případně těleso se schopností pohybu v podélném a příčném směru. Právě toto zjištění vedlo k myšlence pokusit se snímat jezdce v jednotlivých jízdních situacích v reálném čase. V této práci se zabývám návrhem, konstrukcí a následným ověřením měřicího řetězce v praxi, který by byl schopen mapovat trajektorii jednotlivých částí těla během jízdy. Přínosem této práce by měl být další krok k vytvoření detailního multi-body modelu, na kterém by bylo možné virtuálně zkoumat a optimalizovat různé prvky a charakteristiky. Tato práce navazuje na dlouhodobý cíl Ústavu automobilního a dopravního inženýrství analyzovat kompletní dynamiku motocyklu.

1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

V následujících kapitolách jsou popsány a vysvětleny principy, které vedou k širšímu pochopení dané problematiky nebo jim byla věnována pozornost v průběhu praktické části.

1.1 FOTOGRAMMETRIE

Fotogrammetrie je vědeckou disciplínou, která pomocí optického měření dokáže přesně definovat tvar, rozměry a pozici jakéhokoliv objektu v prostoru pomocí fotografií bez fyzického kontaktu. Samotný pojem vznikl spojením tří slov: Photos znamenající světlo, Gramma znamenající psát či kreslit a Metrein znamenající měřit [1]. První aplikace této metody se datují kolem roku 1850, kdy byla pomocí více snímků vytvořena topografická mapa. Tato metrická zobrazovací metoda je považována za první bezkontaktní metodu měření. Využívala se i v rámci pozemní fotogrammetrie, kdy se k určení prvků vnější orientace používal fototeodolit. Na obr. 1 je zobrazen první fototeodolit sestrojený v roce 1859 mechanikem F. K. Brunnerem.



Obr. 1 První fototeodolit byl sestaven v roce 1859 [2].

S překotným rozvojem digitální technologie se tato disciplína plně přesunula do digitální úrovně. Stále rostoucí využití počítačů má a nadále bude mít velký dopad na fotogrammetrii. Disciplína je v neustálém vývoji a představování novinek [3].

Pro rekonstrukci objektu je zapotřebí sada dvourozměrných fotografií, s jejichž pomocí je objekt převeden do 3D.

Mezi informace, které lze z fotografie zjistit, patří [3]:

- Geometrické informace – jedná se o nejdůležitější zdroj informací zahrnující prostorovou polohu a tvar objektů.
- Fyzikální informace – informace o vlastnostech elektromagnetického záření, vlnové délky či energie záření.
- Sémantické informace – souvisejí s významem obrazu. Získáváme interpretací získaných dat.
- Časové informace – mapující změnu polohy objektu v čase, získaná především porovnáním více snímků z různých časů.

1.1.1 PRINCIP

Principem fotogrammetrie je stereoskopický náhled na objekt a jeho převedení do 3D projekce. Pokud máme k dispozici několik snímků stejného objektu z více úhlů pohledu, můžeme získat souřadnice jakéhokoliv bodu nacházejícího se alespoň na dvou snímcích.

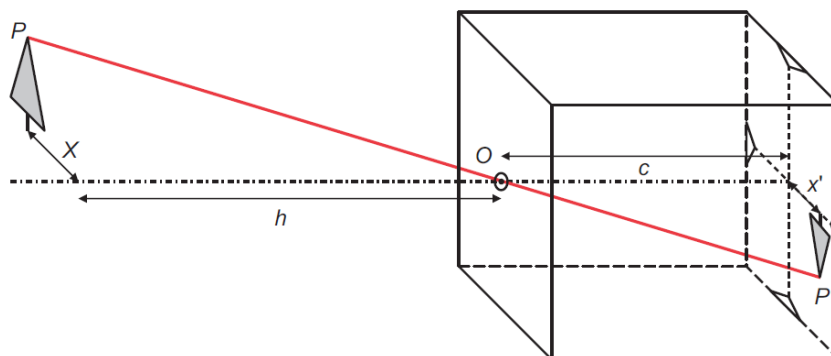
CENTRÁLNÍ PROJEKCE

V případě ideálního objektivu představuje fotografický snímek centrální projekci (středový průmět) zobrazeného objektu, kde střed promítání reprezentuje střed objektivu a zobrazovanou rovinou je digitální snímač. Každému jednotlivému bodu na objektu odpovídá konkrétní bod na snímkové rovině. Jednotlivé paprsky vedené od odpovídajících bodů se protínají v bodě zvaném střed promítání. Soubor těchto paprsků je označován pod pojmem fotogrammetrický svazek paprsků [4].

VNITŘNÍ ORIENTACE SNÍMKU

Parametry vnitřní orientace popisují vnitřní geometrický model kamery. Nejdůležitějším referenčním místem, jež vychází z dírkového modelu (obr. 2), je střed promítání **O**, kterým prochází svazek paprsků. Střed promítání je definován vnitřní geometrií vůči souřadnému systému fotoaparátu. Důležitým parametrem vnitřní orientace je vzdálenost **c**, jež definuje vzdálenost mezi rovinou obrazu a středem promítání. Mezi další parametry patří měřítko fotografie **m_m**, jež definuje vztah mezi hlavní vzdáleností **c** a vzdáleností objektu **L**, popřípadě vztah mezi vzdáleností v rovině objektu **X** a vzdáleností **x'**, promítnuté v obrazové rovině, jejichž směry jsou rovnoběžné [4], [5].

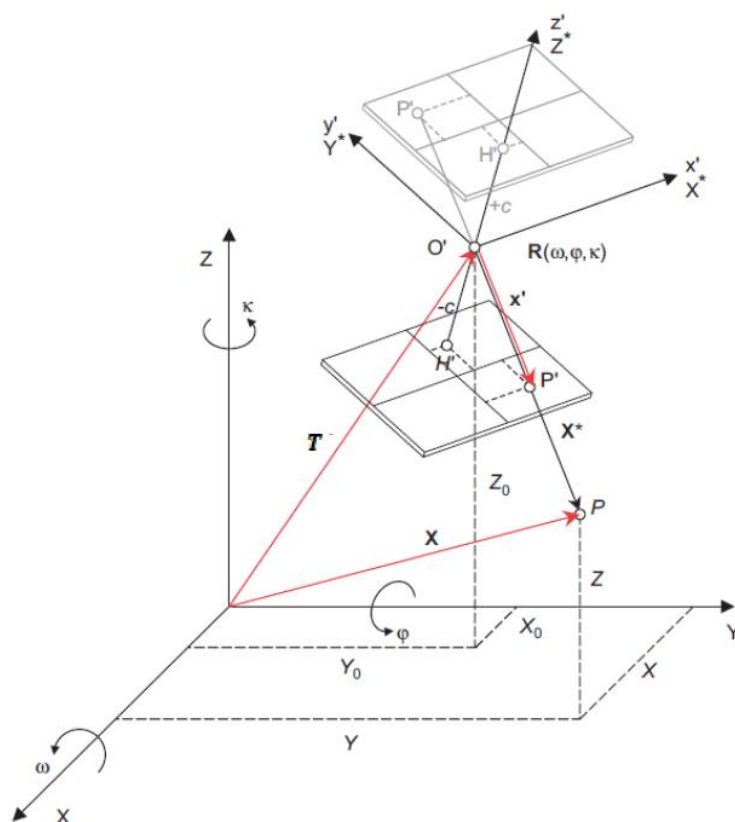
$$m_m = \frac{L}{c} = \frac{X}{x'} \quad (1)$$



Obr. 2 Princip dírkového modelu komory [6].

VNĚJŠÍ ORIENTACE SNÍMKU

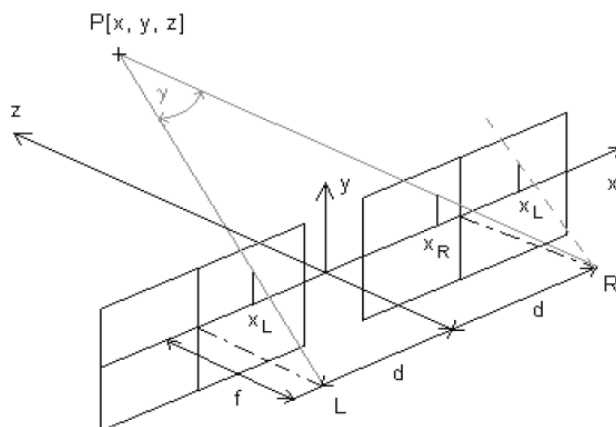
Parametry vnější orientace definují orientaci a prostorovou polohu obrazového snímáče v globálním souřadném systému. Na obr. 3 je zobrazen souřadný systém fotoaparátu (x' , y' , z'), jež umístěn v globálním systému X , Y , Z . Poloha fotogrammetrického svazku v prostoru je definována šesti prvky vnější orientace: souřadnice X_0 , Y_0 , Z_0 středu promítání a ω , φ , κ úhly natočení souřadného systému vůči globálnímu systému [7], [8].



Obr. 3 Vnější orientace objektivu kamery [6].

STEREOFOTOGRAMMETRIE

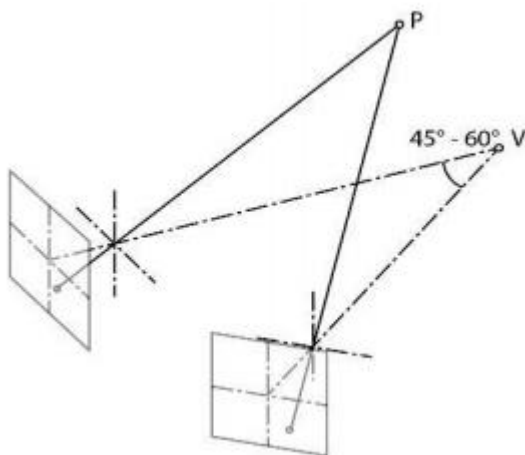
Stereofotogrammetrie je založena na stereoskopickém vnímání. K pořizování stereoskopických snímků se používají speciální fotogrammetrické kamery, přičemž k následnému vyhodnocování jsou použity vždy dva snímky, jejichž osy záběru jsou rovnoběžné. V případě odchylky od rovnoběžnosti je třeba snímky zkorigovat. Vzájemná poloha obou kamer je předem známa. Stejné vnímání mají i naše oči, kdy prostorový efekt vzniká protnutím pozorovacích paprsků. Čím větší je základna mezi kamerami (očima), tím více je umocněn prostorový efekt [3], [5], [7], [9].



Obr. 4 Princip pozemní stereofotogrammetrie [10].

PRŮSEKOVÁ FOTOGRAMMETRIE

Jedná se o jednu z prvních metod fotogrammetrie. Objekt lze vyhodnotit, jsou-li použity dva snímky pořízené z různých stanovišť, jejichž poloha je známa v souřadném systému. Snímky se musí dostatečně překrývat, aby bylo možné vyhodnotit jejich obsah. Osy záběru jsou různoběžné a jejich úhel by měl být přibližně $45^\circ - 60^\circ$. Pro dostatečný úhel záběru je vhodná větší délka základny [5], [11].



Obr. 5 Princip průsekové fotogrammetrie [5].

BUNDLE ADJUSTMENT

K rekonstrukci předmětu z více snímků se využívá různých algoritmů pro triangulaci. Jedním z nich je algoritmus „Bundle adjustment“, který má velký význam v rámci blízké fotogrammetrie. Algoritmus počítá vnitřní i vnější parametry orientace snímku stejně tak jako souřadnice bodů objektu, které jsou potřeba pro následnou analýzu v příslušném softwaru. Jeho snahou je co nejpřesněji odhadnout a predikovat polohu pozorovaných bodů v sadě snímků. Jedná se o iterační metodu, jež je řešena jako nelineární problém nejmenších čtverců [3], [12].

1.1.2 DĚLENÍ

Samotný pojem fotogrammetrie je velmi obsáhlý, proto jej dále dělíme podle různých kritérií, podmínek či použitých technologií [5], [9], [13].

MÍSTA POŘÍZENÍ SNÍMKŮ

- a) Blízká fotogrammetrie
- b) Pozemní fotogrammetrie
- c) Letecká fotogrammetrie
- d) Družicová fotogrammetrie

a) V případě blízké fotogrammetrie se velikost pozorovacích objektů pohybuje v řádech centimetrů až jednotek metrů. Její použití je především v průmyslové technologii, kde nachází uplatnění v metrologii.

b) O pozemní fotogrammetrii hovoříme, pokud je podkladem snímek (snímky) pořízený z pevného stanoviště na zemi, které lze geodeticky přesně zaměřit. Snímky lze pořídit až do vzdálenosti cca 500 m. Využití je především v měření méně rozsáhlejších území např. lomy, horské oblasti či archeologická naleziště. Nevýhodou může být překrytí oblasti zájmu jinými objekty, které znemožňují přesné vyhodnocení snímků.

c) U letecké fotogrammetrie se snímací přístroj nachází v letadle či jiném prostředku. Určení orientace snímku a okamžité prostorové polohy je zde složitější. Výhodou je možnost mapovat těžko dostupné oblasti a rozsáhlá území. Uplatnění nalézá především v tvorbě a evidenci mapových podkladů nejrůznějších měřítek.

d) Podklady jsou pořízeny z kosmických nosičů. Výstupní data nejsou přímo použitelná, proto je většinou podmínkou následné zpracování odpovídajícím softwarem. Výsledkem může být např. tvorba geografických map středního měřítká.

ZPŮSOB VYHODNOCENÍ

- a) Jednosnímková
- b) Vícesnímková

- a) Vyhodnocení probíhá u každého snímku jednotlivě. Po zpracování lze změřit pouze rovinné souřadnice, tedy 2D rozměry. Při spojení s leteckou fotogrammetrií se svislou osou záběru lze vytvořit polohopis rovinné oblasti. Uplatnění lze dále nalézt ve stavebnictví či architektuře.
- b) Pro vyhodnocení se používá dva a více snímků, přičemž objekt musí být zobrazen alespoň na dvou snímcích. Výsledkem zpracování jsou prostorové souřadnice předmětu. Použití dvou snímků je využito například v průřezové metodě nebo stereofotogrammetrii.

ZPŮSOB ZÍSKÁVÁNÍ INFORMACÍ ZE SNÍMKU

- a) Analytické metody
 - b) Analogové metody
 - c) Digitální metody
-
- a) Snímkové souřadnice jsou převedeny do geodetického systému pomocí prostorových transformací, jež jsou zpracovávány počítačově.
 - b) Snímky jsou zpracovávány pouze mechanicky a pomocí optiky. Ke zpracování a vyhodnocení se využívají analogové jednoúčelové stroje.
 - c) Metoda využívaná v současnosti, kdy jsou snímky pořizovány v digitální podobě a současně pak v této podobě i zpracovávány. I méně výkonné počítače jsou schopny pracovat s fotografiemi ve vysokém rozlišení [7].

OFFLINE

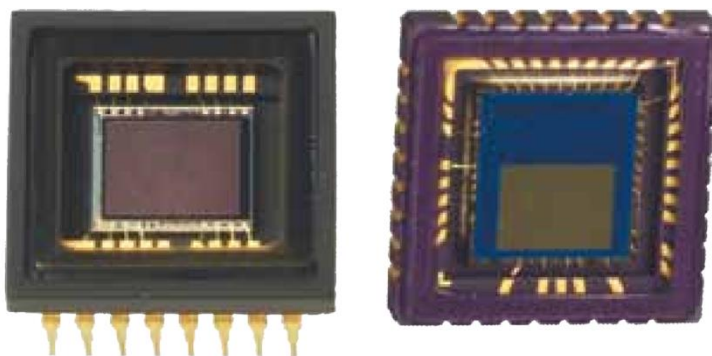
Hlavním znakem offline systému je pořízení minimálně dvou snímků za použití jednoho a více fotoaparátů. Až následně dochází k orientaci a zpracování 3D souřadnic referenčních bodů. Celý úkon zpracování není fixován na přesný čas, případně místo. Offline systémy jsou vhodné pro průmyslové měření díky své univerzálnosti [4].

ONLINE

Online fotogrammetrie se na rozdíl od offline vyznačuje schopností měřit v reálném čase včetně vyhodnocování. Sestava je složena ze dvou již synchronizovaných a předem zkalibrovaných kamer, kde je známa orientace a poloha ve vztahu ke zvolenému souřadnicovému systému. Přesnost je zpravidla nižší než v případě offline systému vlivem limitovaného množství pořízených snímků [4].

1.2 OBRAZOVÉ SNÍMAČE

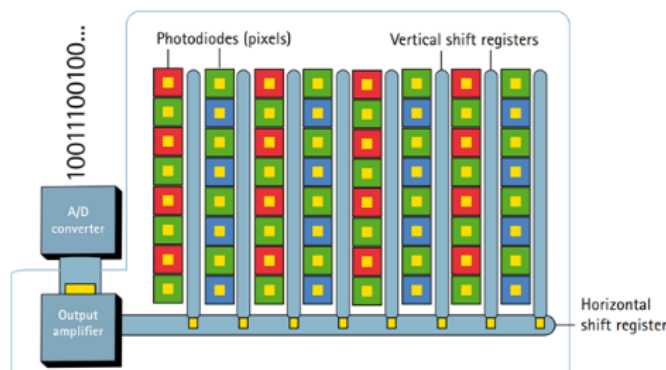
Obrazový snímač je součástka, která se používá ve fotoaparátech a videokamerách. Hlavní funkcí je zachycení procházejícího světla skrz objektiv, jenž dopadá na pixely snímače. Následně je podle intenzity světla generováno dané množství párů (elektron-díra). Čím větší je intenzita světla, tím více párů je generováno. Elektrony jsou převedeny na napětí a následně na digitální signál pomocí A/D převodníků. Na závěr je signál zpracován procesorem. Mezi nejpoužívanější dvojici snímačů patří Complimentary MetalOxyde Semiconductor sensor (CMOS) a Charge Coupled Device sensor (CCD) zobrazené na obr. 6 [14], [15].



Obr. 6 CCD snímač nalevo, CMOS snímač napravo [16].

1.2.1 CCD SENZORY

CCD senzor je elektronická polovodičová součástka obsahující mimo jiné mřížku buněk, které jsou tvořeny mikrokondenzátory. Po osvětlení polovodičových přechodů fotony jsou generovány elektrony, které jsou zachyceny mikrokondenzátory do doby odeslání do A/D převodníku ke zpracování. CCD senzory mají pouze jeden A/D převodník. Způsob odeslání je následující: nejdříve převodník postupně zpracuje všechny elektrony v řadě pomocí změny napětí, a následně se všechny elektrony z ostatních řad přesunou o řádek níže. Postup zobrazený na obr. 7 se opakuje do doby, než jsou všechny elektrony zpracovány. CCD senzory lze rozlišit podle typu použité závěrky. Příkladem může být plošný nebo interline [15], [17], [18].



Obr. 7 Způsob zpracování elektronů v CCD snímači [16].

PLOŠNÝ CCD SENZOR

Použití toho senzoru je převážně ve vědeckých aplikacích. Po každé jednotlivé expozici je zavřena mechanická závěrka pro eliminaci možného rozmazání obrazu. Snímač je připraven na následnou expozici již během vyhodnocování nábojů [15].

- K výhodám patří vysoká citlivost, kvalita a snímání celého obrazu najednou.
- Nevýhodou je vyšší napětí, a tedy i vyšší energetická zátěž, nutnost mechanické uzávěrky a nestandardní postup výroby zvyšující výrobní náklady.

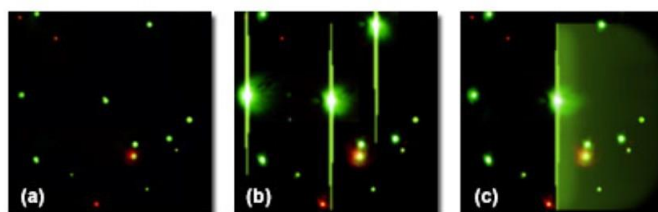
INTERLINE CCD SENZOR

Náboje uložené v pixelech jsou nejdříve posunuty do pomocných registrů a až následně do hlavního registru, jež vede do zesilovače a A/D převodníku.

- Mezi výhody patří absence uzávěrky a expozice během stahování předchozího snímku.
- K nevýhodě patří citlivost pouze poloviny snímače.

BLOOMING

V případě intenzivního osvětlení fotodiod je generováno velké množství elektronů, jež můžou proudit i do vedlejších buněk-pixelů, viz obr. 8. Rozlišují se dva typy bloomingu podle jeho směrovosti – vertikální a horizontální. Částečně lze tomuto jevu zabránit krátkým expozičním časem [15].

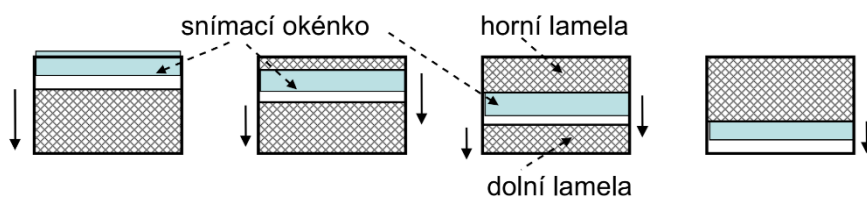


Obr. 8 a) bez bloomingu b) vertikální blooming
c) horizontální blooming [19].

1.2.2 CMOS SENZORY

CMOS senzory jsou vybaveny pro každý obvod vlastním A/D převodníkem, který přímo převádí napětí vyvolané fotoelektrickým jevem. Podle metody snímání obrazu lze CMOS rozdělit na Rolling Shutter a Global Shutter, přičemž u druhé metody se jedná o dražší provedení. V případě metody Rolling Shutter může dojít k výraznému zkreslení snímku hlavně u dynamických dějů. Na rozdíl od CCD senzorů se kvůli většímu počtu A/D převodníků zvyšuje intenzita šumu [14], [18].

V případě snímače typu Rolling Shutter s použitím elektronické závěrky je princip závěrky zobrazen na obr. 9.



Obr. 9 Princip snímání obrazu typu Rolling Shutter [14].

- CMOS senzory jsou hromadně využívány v dnešních kamerách a fotoaparátech díky svým rozměrům, a tím snazší zástavbě i nižší výrobní ceně, která je dána shodným technologickým postupem výroby jako u počítačových mikročipů. Další výhodou plyne z absence přesunu elektronů, tím i nižšímu napětí a ve výsledku i nižší energetickou náročností vůči CCD senzoru.
- Nevýhoda tohoto typu se projevuje při dynamických dějích, kdy odlišné části snímku jsou exponovány v různý čas a různém intervalu. Důsledkem je deformace objektů na snímku, které jsou jinak rovné.

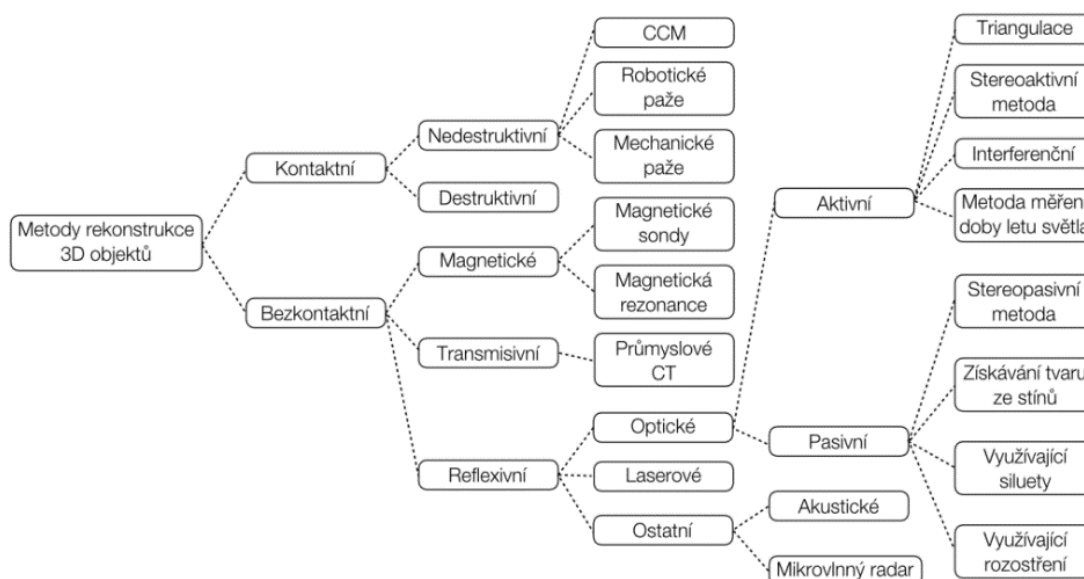
Porovnání jednotlivých typů senzoru CMOS je na obr. 10.



Obr. 10 Porovnání typu Global Shutter (nahore) a Rolling Shutter (dole) [20].

1.3 3D SKENERY

V současné době jsou konvenční metody měření ve stále větší míře nahrazovány 3D skenovacími metodami. Jedná se o proces analýzy reálného předmětu, jehož cílem je sběr dat zahrnující geometrický tvar či barvu za účelem digitalizace a konstrukce 3D modelu. Tato technologie nabízí nepřehledné možnosti využití v praxi, např. součástí reverzního inženýrství, tvorby prototypů, kontroly kvality, medicíny nebo při digitalizaci archeologických nálezů. Existuje mnoho principů, které jsou základními stavebními kameny jednotlivých metod. Mezi nejzákladnější rozdělení 3D skenerů (obr. 11) patří kontaktní a bezkontaktní, přičemž nejpoužívanější skenery spadají do kategorie bezkontaktních reflexivních. V následujícím odstavci bude věnována pozornost pouze vybraným metodám [21], [22], [23].



Obr. 11 Rozdělení metod 3D skenování [24].

1.3.1 KONTAKTNÍ SKENOVÁNÍ

Základní princip kontaktních 3D skenerů je založen na fyzickém kontaktu mezi povrchem předmětu a měřicí sondou. Tyto skenery jsou konstruovány především jako stacionární. Přesnost měření je z velké části ovlivněna použitým typem skeneru [21].

NEDESTRUKTIVNÍ SKENERY

Hlavním rysem této metody je absence mechanického poškození zkoumaného předmětu během digitalizace. Jednotlivá místa, body zájmu a síť snímacích bodů je žádoucí zaznamenat na těleso ještě před skenováním. Při ideálních podmínkách lze dosáhnout přesnosti v řádu mikrometrů, díky tomu nachází tato metoda uplatnění např. ve strojírenství. K výhodám patří možnost skenovat složité tvary, neprůchozí otvory a obecně místa, kde není možno použít optické skenery. Mezi nevýhody patří rychlost skenování, kdy za daný časový úsek je získáno pouze malé množství bodů ve srovnání s bezkontaktní metodou. Tuto technologii využívají souřadnicové měřicí stroje a skenery umístěné na mechanické ruce nebo robotu [21].

DESTRUKTIVNÍ SKENERY

Hlavním znakem destruktivní metody je jednorázové využití skenovaného předmětu, jelikož během skenování je zničen. Mezi hlavní přednosti patří především možnost skenovat nejen vnější geometrii, ale i vnitřní strukturu předmětu. Se zvětšujícím se rozvojem 3D tisku tato metoda může hrát důležitou roli právě díky snímání vnitřní struktury.

Před samotným začátkem procesu snímání je zkoumaný předmět zalit do speciálního materiálu, který zajistí výplň dutin a dostatečný barevný kontrast mezi barvou použitého materiálu a daným předmětem. Následně je zalitý předmět vložen a upnut do stroje, kde fréza odfrézuje určitou tloušťku materiálu. Po každém odfrézování je daný povrch nasnímán. Tento postup se opakuje, dokud není celý předmět naskenován. Výstupem je 3D model sestavený z jednotlivých 2D skenů odfrézovaných vrstev [21].

1.3.2 BEZKONTAKTNÍ SKENOVÁNÍ

Hlavní princip bezkontaktních skenerů spočívá v tom, že zde není nutnost fyzického kontaktu se skenovaným povrchem. Měření je uskutečňováno mezi zdrojem záření a povrchem. Výhodou proti kontaktní metodě je vyšší rychlost skenování a také možnost skenovat různé materiály, které nejsou příliš vhodné pro kontaktní technologii kvůli deformaci, např. kůže či pěna. Výstupem měření je tzv. bodové mračno. Základní rozdělení skenerů je na magnetické, transmisivní a reflexivní, přičemž dále bude krátce věnována pozornost optickým skenerům [21].

OPTICKÉ SKENOVÁNÍ

Jedná se o bezkontaktní metodu a skenování předmětu probíhá z několika úhlů za využití optického záření. Principem je vytvoření sady 2D snímků celého předmětu a na základě těchto dat je vytvořeno mračno bodů reprezentující digitalizovaný 3D model. Pro orientaci jsou na objekt nebo v jeho okolí nalepeny kódované nebo nekódované referenční body. Skenovat lze i velké plochy, které by např. ve srovnání s laserovou metodou trvaly dlouhou dobu.

Jednou z mnoha možností optického skenování je využití metody strukturovaného světla, kdy je na zkoumaný předmět promítnuto „modré“ světlo z projektoru kamery s řadou lineárních rastrových vzorů. Následně je každý promítnutý okraj pásu vyhodnocen a pomocí triangulace dopočítána vzdálenost od povrchu objektu ke skeneru [25]. Jedná se o velmi přesnou metodu, k čemuž přispívá vysoké rozlišení. Také je zde nízká úroveň hluku. Určitým limitujícím faktorem může být malá skenovací plocha v případě skenerů nižších řad. Rovněž celkové rozměry a systém zajišťují mobilitu, ale stále se jedná o rozměrnou sestavu vylučující ruční skenování. Ačkoliv je možné snímat povrchy různorodé, přesto se musí věnovat určitý čas jejich přípravě, zvláště pak u povrchů lesklých nebo průhledných, které je nutno předem zmatnit [26]. Další úskalí může spočívat v komplikaci při skenování slepých otvorů či dalších různě tvarově slepých míst [27].

1.4 ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI MOTOCYKLU

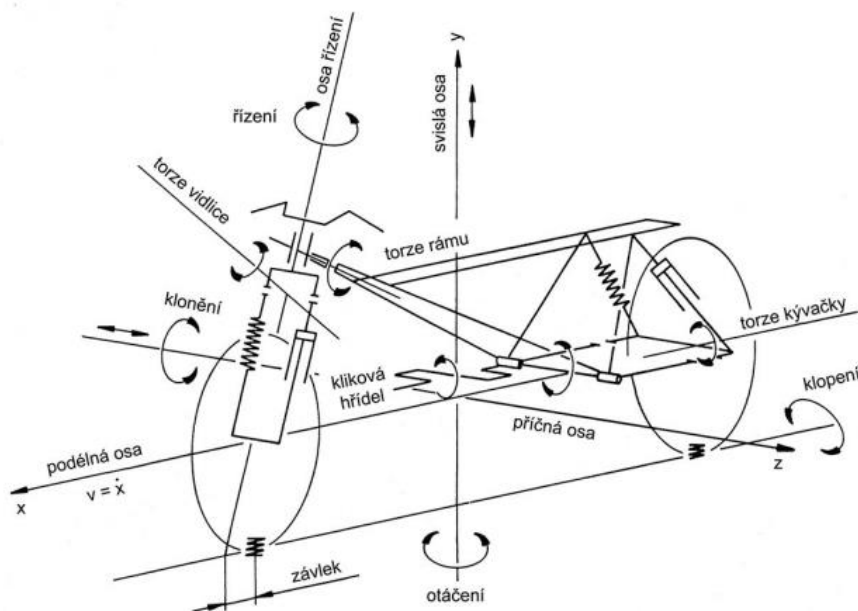
Na pohyb motocyklu je možné pohlížet ze dvou základních úhlů, kinematického a dynamického, přičemž oba spolu hluboce souvisí. Kinematika značně ovlivňuje dynamické vlastnosti, a tedy i výsledné chování stroje [28].

1.4.1 DYNAMICKÉ VLASTNOSTI MOTOCYKLU

Dynamické vlastnosti motocyklu lze popsat pomocí výrazů jako jsou například stabilita, ovladatelnost a manévrovatelnost. Manévrovatelnost a ovladatelnost popisují schopnost motocyklu provádět složité manévry i náročnost jejich provedení pro jezdce. Opakem toho je stabilita, jež znamená schopnost motocyklu udržovat rovnováhu v reakci na vnější vlivy, jako je nerovný povrch vozovky nebo poryvy větru [28].

SMĚROVÁ STABILITA MOTOCYKLU

Pokud je motocykl v pohybu, musí ho jezdec mít neustále pod kontrolou. Chování jezdce ovlivňuje stabilitu motocyklu a trajektorii pohybu vpřed. O směrové stabilitě lze hovořit v případě, že je motocykl snadno kontrolovatelný nebo má tendenci udržovat rovnováhu a přímočarý směr. Na druhou stranu čím vyšší je směrová stabilita, tím obtížněji je motocykl ovladatelný, tzn. převládá pocit těžkopádnosti, např. v rychle se měnících zatáčkách [28].



Obr. 12 Schéma motocyklu s vyznačenými osy a terminologií rotací [29].

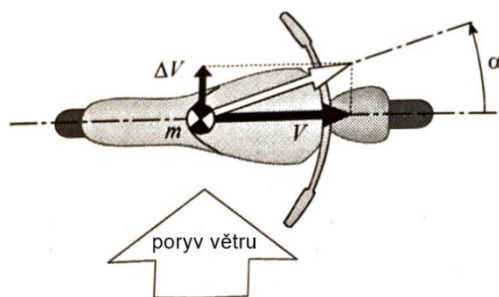
Směrová stabilita motocyklů je určena řadou faktorů [28]:

- Setrvačnými vlastnostmi motocyklu
- Rychlostí
- Geometrickými parametry úhlu řízení
- Gyroskopickými efekty
- Vlastnostmi pneumatik

Je známo, že čím větší je hybnost motocyklu, tím více je odolný vůči změně přímé trajektorie při působení vnějších sil, např. poryv větru na obr. 13. Předpokládáme, že aerodynamická síla generovaná poryvem větru působí na motocykl pouze po krátkou dobu, která se blíží k nule. Síla větru způsobí úhlovou odchylku motocyklu od přímé dráhy, jenž má hodnotu:

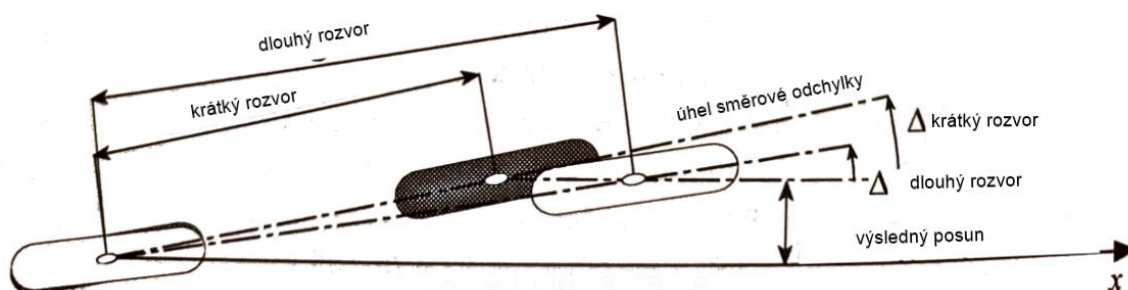
$$\alpha = \arctg \frac{\Delta V}{V} = \arctg \frac{F \cdot \Delta t}{m \cdot V} \quad (2)$$

Úhel odchylky je nepřímo úměrný hmotnosti motocyklu a jeho rychlosti vpřed a přímo úměrný boční aerodynamické síle.



Obr. 13 Směrové chování motocyklu při působení boční síly [28].

Při určování směrové stability hraje poměrně důležitou roli také délka rozvoru motocyklu. Obr. 14 ukazuje, jak se motocykl s krátkým rozvorem chová odlišně od motocyklu s dlouhým rozvorem. Pokud vnější síla způsobí posun předního kola, je úhel směrové odchylky od přímočaré dráhy nepřímo úměrný délce rozvoru [28].



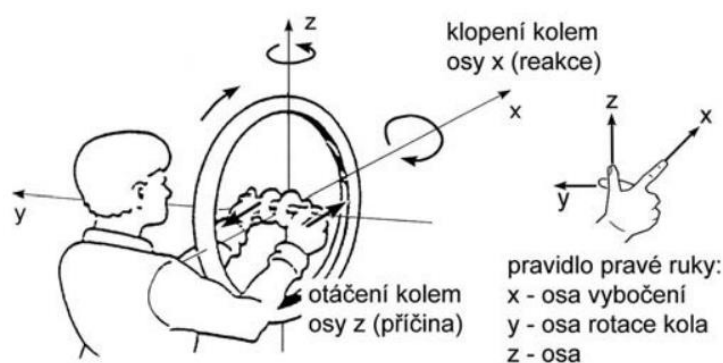
Obr. 14 Úhel směrové úchylky motocyklu v závislosti na délce rozvoru [28].

VLIV GYROSKOPICKÉHO MOMENTU

Gyroskopický moment je obecně vytvářen rotací tuhého tělesa kolem dvou os. Rotace představuje otáčivý pohyb okolo vlastní osy a působením vnějších sil se mění orientace osy tuhého tělesa, tedy precese. Příkladem je obr. 15 zobrazující klopení kola jako reakci na natočení kola okolo svislé osy. Pomůckou pro určení směru je pravidlo pravé ruky.

Kola motocyklu působí jako setrvačníky gyroskopu, který se snaží zachovat pozici motocyklu v přímém směru a zpřímá. V nízkých rychlostech je stabilita motocyklu ovlivněna převážně zručností a pohyby jezdce, dále pak samotnou geometrií a hmotností stroje. Se zvyšující se rychlostí přebírá stabilitu gyroskopický moment kol a vliv jezdce se tak snižuje. Pokud nastane situace, kdy se stane motocykl nestabilní, lze stroj stabilizovat například akcelerací, pohybem jezdce nebo řízením pomocí řídítek. Obecně platí, že gyroskopické efekty hrají obzvláště důležitou roli při manévrovatelnosti a směrové stabilitě. Mnoho gyroskopických efektů se projevuje až při zatáčení nebo výjezdu ze zatáčky.

Příkladem gyroskopického momentu může být zatáčení. Pokud otočíme řídítka vlevo, tak gyroskopický moment bude mít tendenci naklopit stroj doprava. Ale pokud budeme klopit stroj např. vpravo, tak řídítka se také stočí doprava. Tohoto principu se využívá při snaze vyhnout se překážce, tedy při prudkých úhybných manévrech [29].



Obr. 15 Směr klopení rotujícího kola při natočení kola kolem osy z [29].

Gyroskopický moment vůči podélné ose x:

$$M_{GX} = J \cdot \omega_y \cdot \omega_z \quad (3)$$

Dále dynamika motocyklu zahrnuje celou řadu gyroskopických efektů, které lze rozdělit následovně [28]:

- Stáčivý gyroskopický efekt – stáčivý pohyb okolo svislé osy, která prochází těžištěm stroje
- Klopící gyroskopický efekt – pohyb okolo osy ležící v rovině vozovky a procházející kontaktními body pneumatik s vozovkou
- Gyroskopický efekt řízení – kde příčka b-b prochází osou řízení.
- Gyroskopický moment motoru

Velikost gyroskopického momentu generovaného motorem závisí na velikosti otáček motoru a zařazeném rychlostním stupni. Směr rotace klikové hřídele je z pravidla shodný se směrem rotace kol. Díky gyroskopickému momentu motoru lze motocykl naklonit o větší úhel, než kdybychom moment zanedbali či by neexistoval. Hodnota momentu je kladná v případě, že jsou oba směry motoru a kol shodné. Jinak je hodnota záporná [28].

TĚŽIŠTĚ MOTOCYKLU

Umístění těžiště je jeden z nejdůležitějších parametrů ovlivňujících chování stroje. Snahou výrobců je umístit jej co nejnižší, zpravidla se nachází v těsné blízkosti palivové nádrže. Na polohu těžiště má vliv mnoho komponent, zejména však geometrie rámu a konstrukce motoru, resp. počet válců motoru. V případě umístění těžiště více do přední části se snižuje ovladatelnost a klesá tendence ke kmitání přední vidlice. Na druhou stranu v případě posunu dozadu nastane odlehčení přední části motocyklu, což má za následek jeho lepší ovladatelnost. Nižší umístění těžiště má pozitivní vliv na stabilitu motocyklu v nižších rychlostech, zatímco těžiště ve vyšší poloze má naopak lepší vliv na stabilitu ve vyšších rychlostech. Důležité je také posouzení umístění těžiště z hlediska celku, tj. stroje i s jezdcem, kdy je možné pomocí úprav polohy řídítek nebo stupaček do jisté míry hýbat s těžištěm [28], [29].

1.4.2 KINEMATICKÉ VLASTNOSTI MOTOCYKLU

Rozvor kol představuje podélnou vzdálenost mezi kontaktními body kol s povrchem. Velikost rozvoru se liší v závislosti na typu a kategorii motocyklu. Obecně se pohybuje kolem 1 200 mm pro maloobjemové skútry až po 1 600 mm u kategorie velkých cestovních strojů.

Za předpokladu samotného zvětšení rozvoru bez změn ostatních parametrů platí, že dochází k nežádoucímu snížení torzní tuhosti rámu, jež má podstatný vliv na chování a ovladatelnost motocyklu. Snížená torzní tuhost rámu snižuje manévrovatelnost stroje. Celkově delší rozvor zvětšuje rozměry stroje, a tedy i výslednou hmotnost. Rovněž delší rozvor zvyšuje poloměr otáčení a znesnadňuje zatočení na menším poloměru. Důsledkem toho je použití větší síly na řídítko. Naopak delší rozvor snižuje přenos zatížení mezi dvěma koly jak při zrychlování, tak i při brždění, čímž snižuje možnost převrácení a příznivě přispívá ke směrové stabilitě.

Úhel řízení je úhel mezi svislou osou a osou rotace přední části, respektive osou hlavy řízení. Podle kategorie motocyklu se pohybuje v rozmezí $21^\circ - 24^\circ$ pro sportovní stroje a $27^\circ - 34^\circ$ pro cestovní. Menší úhly více namáhají přední vidlici, čímž se stává ohybově i torzně deformovatelnější. V krajním případě hrozí vznik nebezpečných vibrací v přední části kolem osy řízení. Velikost úhlu úzce souvisí s délkou závleku předního kola.

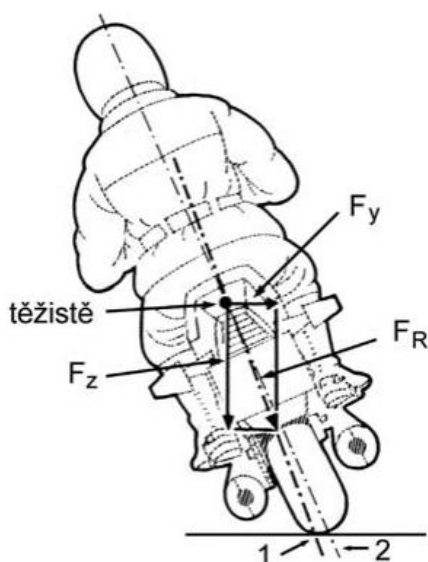
Závlek předního kola je vzdálenost mezi kontaktem kola s vozovkou a osou řízení, přičemž vzdálenost je měřena na vozovce. Stejně jako u předchozích parametrů, tak i v tomto případě záleží velikost závleku na typu motocyklu. Hodnoty se pohybují v rozmezí 75 mm – 100 mm. Delší závlek má za následek větší stabilitu při vyšších rychlostech.

Rozdělení zatížení kol značně ovlivňuje stabilitu především při vyšších rychlostech. Při větším zatížení přední části motocyklu se zmenšuje závlek kola a také se mění úhel hlavy řízení. V neposlední řadě se zmenšuje celkový rozvor [28], [29], [30].

1.5 ATRIBUTY JEZDCE

1.5.1 POZICE JEZDCE PŘI JÍZDNÍCH SITUACÍCH

Dosažením rovnováhy motocyklu v zatáčce lze docílit pouze pokud výslednice z odstředivé síly a tíhy motocyklu spolu s jezdce (pokud obě síly působí v těžišti) prochází rovinou mezi stykovými body zadní a přední pneumatiky s jízdní dráhou, obr. 16.

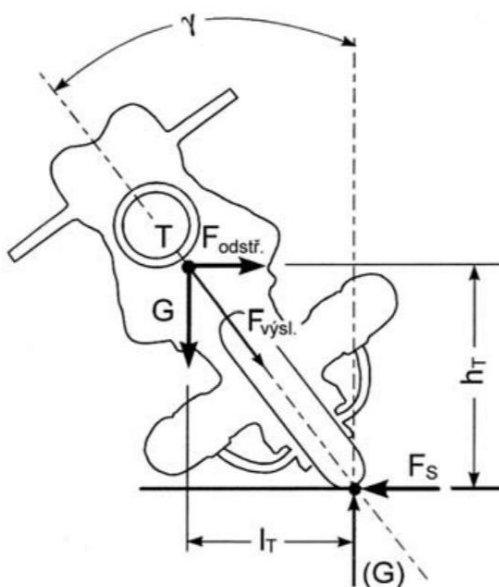


- F_y – odstředivá síla
- F_z – celková tíha
- F_R – výslednice sil
- 1 – okamžitá osa styku kola s vozovkou
- 2 – střední osa stroje

Obr. 16 Rovnováha sil při průjezdu zatáčkou [29].

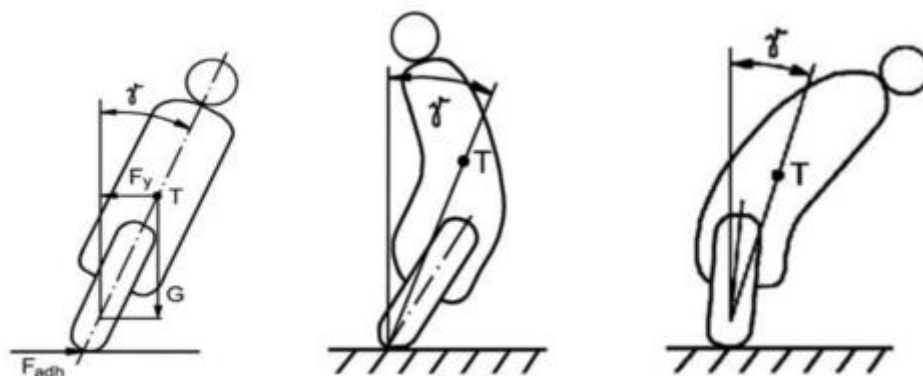
Pro zabránění pádu vlivem působení odstředivé síly je nutné naklonit motocykl tak, aby spojnice těžiště jezdce se strojem a stykovou přímkou kol svírala úhel γ (obr. 17) vůči jízdní dráze, který je definován rovnicí (4). Samotný vztah je platný pro ideálně úzké kolo, v případě reálně široké a zaoblené pneumatiky se tento vztah liší.

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{F_{\text{odstř}}}{G} = \frac{m \cdot v^2}{R \cdot m \cdot g} \quad (4)$$



Obr. 17 Úhel naklonění γ nutný k projetí zatáčky [29].

Prioritou pro dosažení požadovaného úhlu γ není náklon samotných kol, ale především rozhodující vliv má poloha společného těžiště jezdce se strojem. Na obr. 18 je možné vidět stejný úhel dosažený pomocí tří zcela odlišných poloh.



Obr. 18 Jízdní styly nutné k naklonění o úhel γ [29].

VLIV JEZDCE NA CHOVÁNÍ MOTOCYKLU

Pozice jezdce na motocyklu je zásadní pro jeho kontrolu. Při špatném posezu ani sebelepší motocykl nedokáže pomoci z krizové situace. Jízdní pozice ovlivňuje brždění, řízení, stabilitu, odpružení, světlou výšku podvozku a přesun hmoty při akceleraci. Přesného řízení lze dosáhnout špičkami nohou na stupačkách, tělem mírně nakloněným dopředu, uvolněnými rukama a volným sevřením řídítek s fixovanými lokty. Správnou polohou těla lze získat cit pro ovládání stroje bez nutnosti křečovitého držení řídítek. Při menších poloměrech zatáček je ovládání řídítek jemné, naopak čím vyšší je rychlost, tím je nutné vynaložit více úsilí [31].

Pro správný průjezd zatáčkou je nutné mít následující posez – nachystanou vnější nohu na stupačce k přitlačení stroje, v bodě zatočení dát povel k zatočení, tedy zatlačit na řídítka takovou silou po dobu, dokud nebude stroj dostatečně nakloněný pro vykroužení zatáčky. Kvůli stabilitě je váha stále na vnější stupačce. Také je vhodné se před samotným započítím zatáčky posunout do přední části sedla [31].

Při brzdném manévru je důležité pevně sevřít motocykl nohama v oblasti nádrže a stupaček, mít uvolněné ruce a snažit se posunout tělo dozadu ještě před samotným bržděním. Při brždění dochází k přesunu hmotnosti na přední kolo, tudíž posun těla dozadu zajistí vyšší zatížení zadního kola, a tedy delší styk zadního kola s vozovkou [31].

Během akcelerace má motocykl tendenci zvedat se na zadní kolo. Toto chování souvisí s polohou těžiště, resp. momentem setrvačnosti. Při vzpřímeném posezu v zadní části sedla bude těžiště vysoko a vzadu, tedy motocykl bude náchylnější k jízdě po zadním kole. Pro úplnou kontrolu nad strojem během zrychlování je důležitá správná poloha za řídítky. Tělo by mělo být posunuté a nakloněné dopředu, nohy pevně svírat rám ve stupačkách [31].

1.5.2 PŘÍSTUP K MODELOVÁNÍ

V posledních letech došlo k výraznému posunu v přístupu k modelování interakce mezi jezdce a motocyklem. Existuje několik možných přístupů k tomuto modelování. Jednodušší přístupy prezentují jezdce jako tuhé těleso, které je pevně spojeno s motocyklem. Mezi další přístupy patří již možnost pohybu jezdce po předem určených osách v podélném a příčném pohybu, ale jezdec je stále brán jako tuhé těleso. Mezi sofistikovanější přístupy patří multi-body modely s konceptem rozdělení jezdce na dvě flexibilní části, od nohou po pas a od pasu po hlavu.

Příkladem pokročilé studie interakce jezdce s motocyklem v prostředí multi-body softwaru je práce Sequenzia et al. Virtuální jezdec s výškou 1,78 m a hmotností 74 kg je vytvořen z 15 částí, z nichž u 8 je hmotnost zanedbatelná a jsou použité pouze pro omezení stupňů volnosti. Celkově má jezdec 28 stupňů volnosti a 5 z nich je přímo měřeno. Spojení jednotlivých částí těla bylo pomocí sférických, rotačních a rovinných vazeb [32].

2 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

2.1 ANALÝZA PROBLÉMU

Podle doposud zjištěných poznatků hraje v ovladatelnosti a stabilitě motocyklu jezdec významnou roli. Díky možnosti se volně pohybovat v rámci omezeného prostoru na motorce dokáže rychle měnit polohu těžiště celku stroj-jezdec. Snahou je zmapovat tyto pohyby a v rámci reverzního inženýrství se pokusit rekonstruovat zmíněný pohyb do digitální podoby k využití pro následné simulace a analýzy. K tomuto procesu je nutné zvládnout techniku fotogrammetrického snímání, zpracování získaných dat a její následné vyhodnocení.

2.2 CÍL PRÁCE

Hlavním cílem této diplomové práce je:

- Navrhnout a sestavit měřicí řetězec, který by byl upevněn na motocyklu a umožňoval by snímat polohu jezdce v reálném čase.
- Experimentálně ověřit funkčnost měřicího řetězce v laboratorních podmínkách a pokusit se přenést snímání do reálného prostředí.
- Získaná data přenést do multi-body modelu s následným určením polohy jezdce.

3 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ MĚŘICÍHO PROTOTYPU

Testovacím strojem k aplikaci měřicí sestavy pro snímání jezdce byl motocykl KTM RC 390, který byl zapůjčen doktorem Luborem Zháňalem. Tento maloobjemový jednoválcový stroj se řadí do kategorie lehkých silničních motocyklů, obr. 19.



Obr. 19 KTM RC 390 2015 [33]

3.1 VÝCHOZÍ STAV STROJE

Připravenost motocyklu k měření vycházela z velké části z diplomové práce Ing. Martina Tobiáše a také z následné práce v rámci jeho doktorského studia.

Motocykl byl osazen snímači a dalším hardwarem, tak aby bylo možné snímat následující parametry, jejichž společnou referencí je čas:

- Úhel směrové úchylky pomocí GPS trajektorie
- Úhel klopení
- Úhel klonění
- Úhel stáčení
- Úhel zatočení řídítek
- Rychlosti ve všech osách
- Zrychlení translační + rotační ve všech osách
- Síly v předních tlumičích pomocí tenzometrů
- Zdvihy předních tlumičů a zadního tlumiče pomocí lineárních snímačů

Dále na základě palubní diagnostiky CAN BUS byly zjišťovány parametry polohy plynové rukojeti a otáček kol.

Tab. 1 Technické parametry KTM RC 390 2015 [34], [35].

Parametr	Hodnota	Parametr	Hodnota
Objem	373,2 ccm	Průměr předního kotouče	300 mm
Vrtání	89 mm	Průměr zadního kotouče	230 mm
Zdvih	60 mm	Přední kolo	17"
Hmotnost	147 kg	Zadní kolo	17"
Výkon	32 kW – 9 500 1/min	Rozvor	1340 mm
Točivý moment	35 Nm – 7 000 1/min	Objem nádrže	10 l
Převodovka	6 st	Úhel řízení	66,5°
Zdvih přední vidlice	125 mm	Výška sedla	820 mm
Zdvih zadní vidlice	150 mm	Maximální rychlost	170 km/h

3.2 SNÍMACÍ ZAŘÍZENÍ JEZDCE

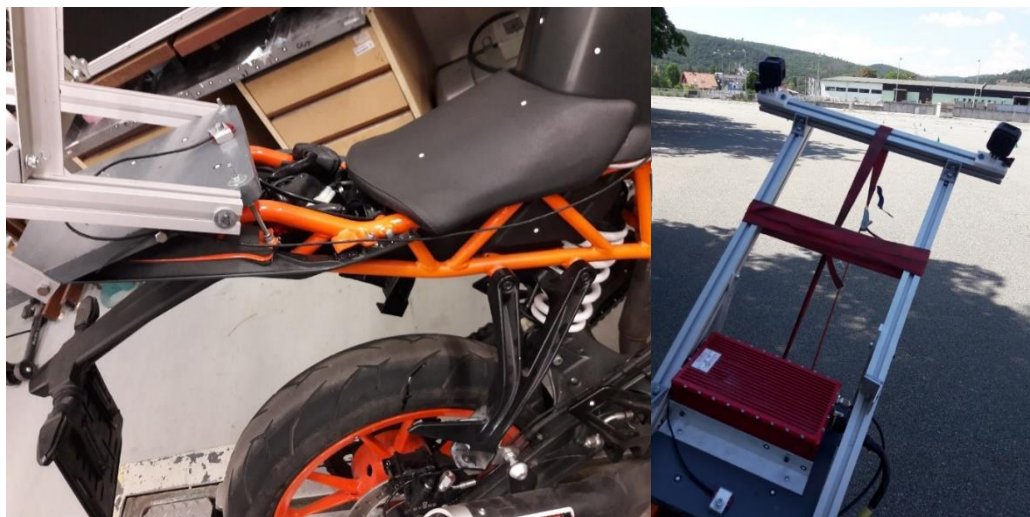
Při výběru způsobu snímání a záznamu pohybu jezdce na jedoucím motocyklu bylo nutné vybrat vhodnou metodu, která by splňovala následující podmínky:

- Nepřekážet ve výhledu jezdce
- Neomezovat při pohybu
- Bezkontaktní metoda
- Dostatečná přesnost
- Univerzální montáž
- Nízká hmotnost

Jednou z metod, která vyhovuje zmíněným podmínkám, je použití fotogrammetrie, resp. dvojice kamer bezkontaktně snímající pohyb jezdce na motocyklu ze zadní části. V dalších kapitolách je popsán postup aplikace této metody, realizace uchycení kamer a uvedení do praxe.

3.2.1 PŘÍDAVNÝ RÁM

Na zadní část motocyklu byl upevněn pomocný rám, který byl uchycen pomocí čtyř šroubů k podsedadlovému rámu stroje, obr. 20. Rám byl seskládán ze spojovacích prvků a průmyslových hliníkových profilů. Do rámu byly připevněny plastové držáky pro uchycení snímacích kamer. Použité plastové držáky byly vytištěny na 3D tiskárně. Při návrhu rámu byl kladen zřetel na umístění měřicí ústředny OxTS RT3002, jednoduchost provedení a případnou variabilitu.



Obr. 20 Konstrukce a uchycení přídatného rámu ke stroji.

3.2.2 KAMEROVÝ SYSTÉM

Pro realizaci této práce byly vybrány kamery od společnosti GoPro, jež se vyznačují malými rozměry, jednoduchostí ovládání a použitelností v extrémních podmínkách.

První kamera od této společnosti byla uvedena na trh v roce 2004 pod označením HERO. V současné době je součástí jejich portfolia také kamera GoPro HERO 5 Session, obr. 21.

Pro realizaci snímání jezdce byly použity dvě kamery HERO 5 Session. Svými malými rozměry a systémem upnutí umožňuje situování kamery kdekoli v prostoru za jezdce. Mezi přednosti patří absence použití propojovacích a napájecích kabelů díky integrované baterii a záznamu dat na vloženou paměťovou kartu. Dále nezanedbatelným parametrem zvolených kamer je nízká pořizovací cena ve srovnání s profesionálními fotogrammetrickými kamerami.



Obr. 21 GoPro HERO 5 Session včetně ochranného krytu s držákem [36].

Tab. 2 technické parametry GoPro HERO 5 session [37], [38].

Parametr	Hodnota	Parametr	Hodnota
Doporučená cena	8 990 Kč	Zvuk	Mono AAC
Snímač – typ/rozlišení	CMOS / 10 Mpix	Konektor	USB-C
Stabilizace	Elektronická	Bluetooth/WiFi	Ano/Ano
Zorný úhel	170°	Mobilní aplikace	Quik
Záznamový nosič	microSD / microSDHC / microSDXC	Rozměry	38 x 38 x 35 mm
Videozáznam – rozlišení	2160p30, 2028p30, 1520p48, 1440p60, 1080p90, 960p100, 720p120	Další vlastnosti	bez pouzdra vodotěsná do 10 m, hlasové ovládání (anglicky)
Fotografie – rozlišení	10 Mpix	Hmotnost	72 g

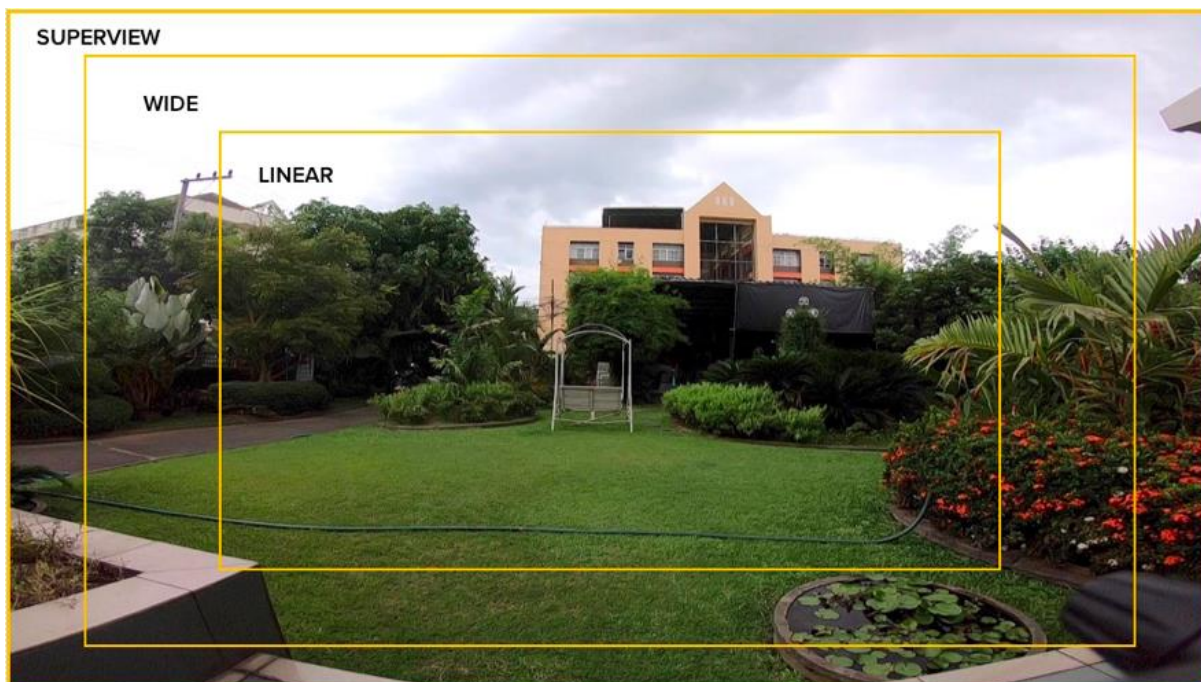
Pro potřeby snímání byly obě kamery nastaveny v režimu Linear, tzn. při maximálním potlačení efektu širokoúhlého rybího oka vytvářejícího zkreslený obraz. Zmíněný efekt je sice u tohoto typu kamer žádoucí, avšak pro naše použití zcela nevhodný. Rozlišení 1080p a frekvence snímání byla nastavena na nejvyšší možnou hodnotu, která představovala 24 snímků za sekundu.

Za normálních okolností je velikost zorného pole určena velikostí prostoru mezi objektivem a snímačem. Podle vzdálenosti čočky je možné rozlišit úhel záběru od lineárního (90°) až po širokoúhlý (cca 170°) [50] – zobrazeno na obr. 22.



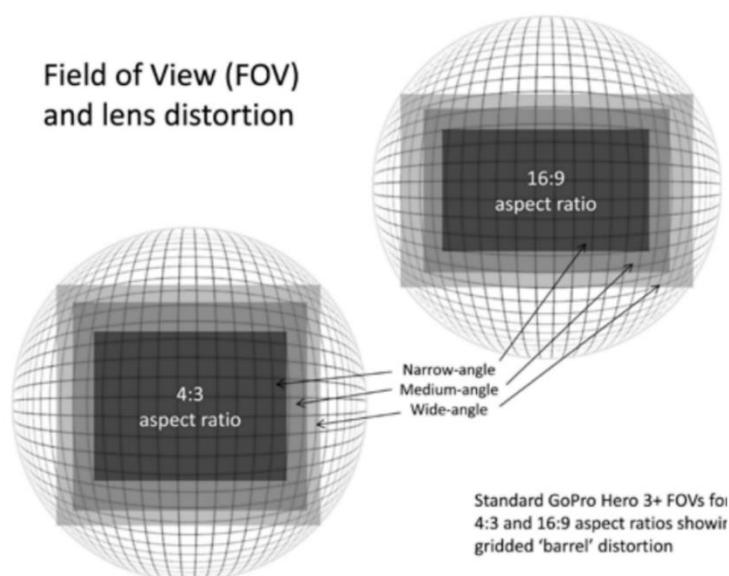
Obr. 22 Jednotlivé režimy podle úhlu záběru [39].

Gopro však používá pevnou čočku, a tedy změny velikosti zorného pole dosahuje pomocí digitálního oříznutí širokoúhlého pohledu [50], názorně je zobrazeno na obr. 23.



Obr. 23 Způsob vytvoření režimu Linear [39].

Výsledný obraz není zcela lineární, ačkoliv došlo k digitální úpravě rozměrů zorného pole, tento princip názorně ukazuje obr. 24. Čím více se předmět vzdaluje od středu pole, tím větší je distorze obrazu, jelikož je zde méně pixelů, které reprezentují větší plochu. Zbytkovou distorzi je proto nutné v co největší míře potlačit pomocí kalibrace, která je popsána v kapitole 3.2.3 [40].



Obr. 24 Princip vzniku distorze i po úpravě režimů [40].

Vzdálenost kamer od stroje byla zvolena na základě požadavku, aby byl viděn celý jezdec a část stroje, respektive hliníkové referenční prvky připevněné na rámu z důvodu nemožnosti zobrazení stroje v zorném poli kamer, obr. 25.



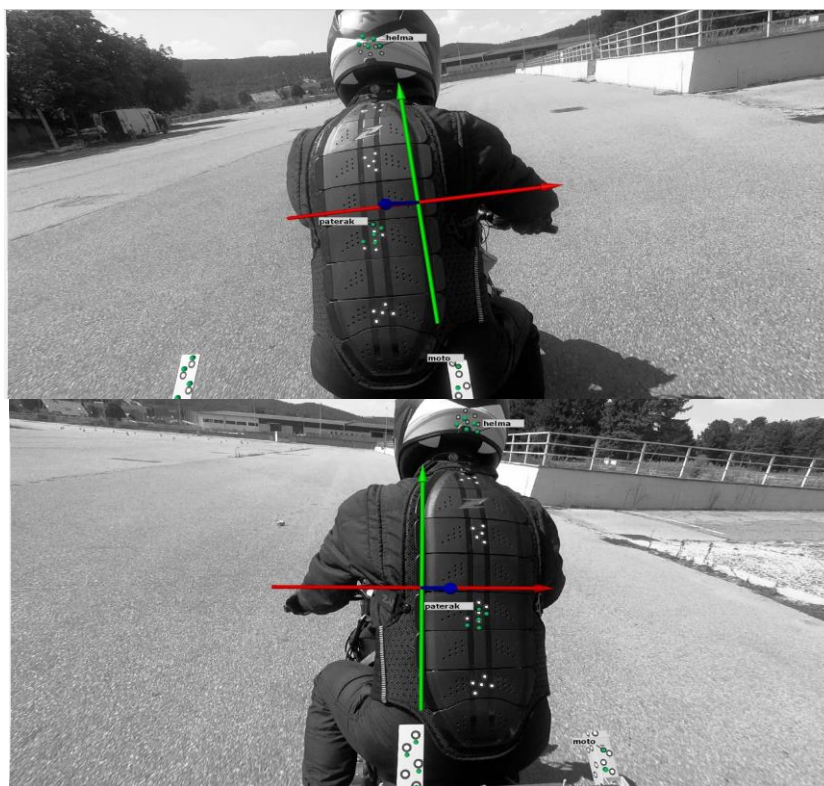
Obr. 25 Pozorované body pomocí kamer.

GoPro kamera byla uchycena k přidavnému hliníkovému rámu pomocí plastového mezikusu – obr. 26, který k nastavení úhlu natočení kamery umožňoval rotaci. Díky podélným drážkám v profilu bylo možné s kamerou posouvat, a tedy i měnit samotnou rozteč mezi oběma kamerami.



Obr. 26 Pohled na způsob uchycení kamer.

Obr. 27 zobrazuje pohled kamer, pravé a levé, pro názornou ilustraci difference pohledu jednotlivých kamer a zároveň pro ověření, že všechny potřebné body se nacházejí v zorném poli kamer. Současně dává představu o velikosti snímaného prostoru okolo jezdce.

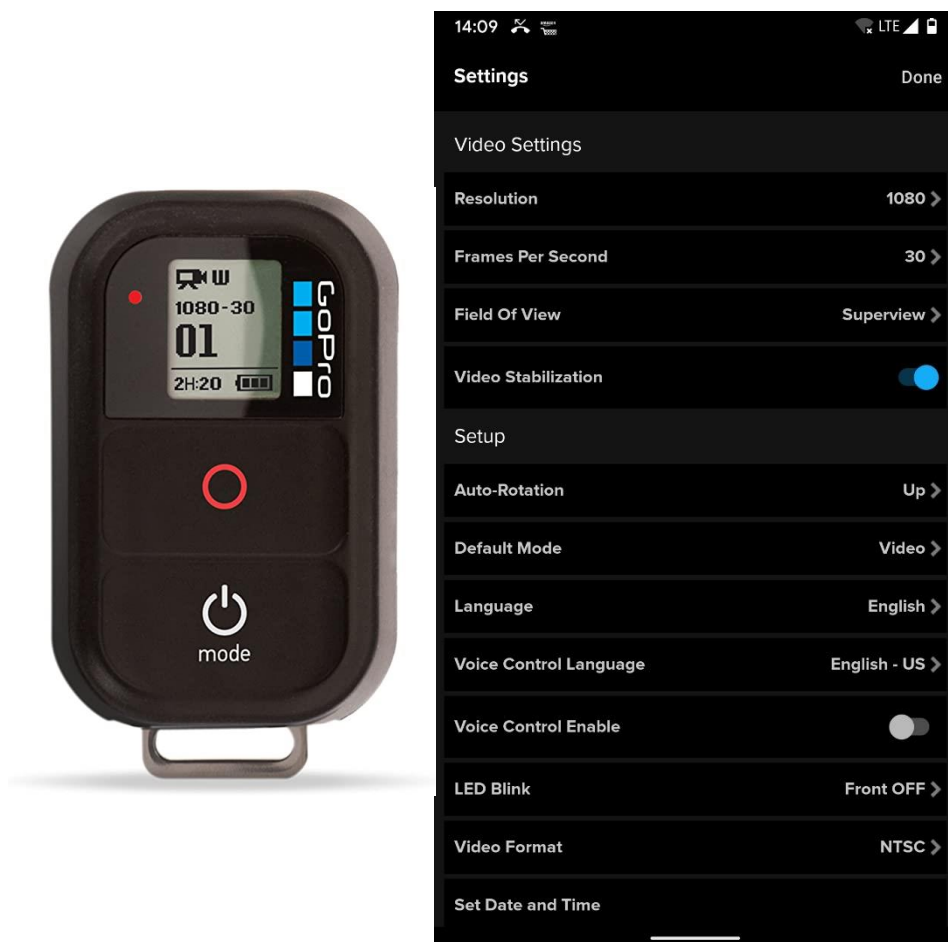


Obr. 27 Porovnání pohledu pravé kamery (horní snímek) a levé kamery (spodní snímek).

OVLÁDÁNÍ KAMER

Ke kompletnímu ovládání kamer je určena mobilní aplikace GoPro Quik vyvinutá společností GoPro, obr. 28. Umožňuje variabilně nastavit všechny měnitelné parametry, online sledovat záběr kamery a stahovat pořízená data. Aplikace je volně dostupná pro zařízení využívající operační systémy iOS nebo Android. Jedná se o jediný možný způsob nastavení všech parametrů kamery na dálku pomocí WiFi.

V této práci byla aplikace použita pro vycentrování záběru jednotlivých kamer, synchronizaci spouštění nahrávání a především pro vzdálené ovládání přes mobilní telefon, které vedlo ke snížení rizika nechtěného pohybu kamery v držáku, a tím rozladění kalibrace. Po počátečním neintuitivním a komplikovaném spojení mobilního telefonu s kamerou, které vyžadovalo mnoho času a trpělivosti, již aplikace fungovala bezchybně.



Obr. 28 Prostředky k dálkovému ovládání kamer. Vlevo GoPro Remote control, vpravo aplikace GoPro Quik.

V počáteční fázi byla každá kamera ovládána zvlášť vlastním telefonem, jelikož synchronizace spuštění nahrávání videa obou kamer zároveň nebylo možné uskutečnit pomocí jednoho telefonu. Tento způsob se však neosvědčil z důvodu vzájemného posunu časové osy jednotlivých videí a nemožnost přesně synchronizovat počátek obou záznamů.

Na základě nepříliš úspěšného ovládání kamer pomocí mobilních telefonů došlo k testování pomocí dálkového ovladače GoPro Remote, obr. 28. Tento dálkový ovladač již umožňoval obsluhu více kamer včetně jejich současného spuštění nahrávání. Po opětovných počátečních problémech se synchronizací mezi kamerami a ovladačem se zdálo být zvolené řešení jako použitelné, avšak po důkladnější kontrole pomocí programu Adobe Premiere Pro CC vykazovala tato metoda stále nepřipustnou diferenci mezi jednotlivými videi.

3.2.3 KALIBRACE KAMER

Dříve než se začne sestava obou kamer používat pro jakékoliv snímání, je nutné kamery zkalibrovat a otestovat, zda je reálné je v nastavené konfiguraci využívat. Teoreticky by bylo možné postupovat i v opačném pořadí, tzn. nejdříve pořídit video záznamy a až poté vytvořit kalibrační soubor nutný pro následný post processing. V případě aplikace tohoto postupu může nastat nutnost provést úpravu poloh kamer během kalibrace, jež má za následek znehodnocení pořízených dat.

Kalibrace probíhala pomocí kalibračního panelu CP 40 MV 560 mm, který je součástí skenovací sestavy GOM ATOS Compact Scan 2M. Kalibrační objekty jsou sestaveny z černých bodů umístěných na bílém pozadí. Větší body jsou situovány uprostřed, právě díky nim skener rozpozná kalibrační objem. Součástí kalibrace nejsou pouze černé body, ale i bílé mezery mezi nimi. Ke každému panelu náleží i kalibrační soubor (*.calobj), obsahuje kalibrační data příslušného panelu [41].

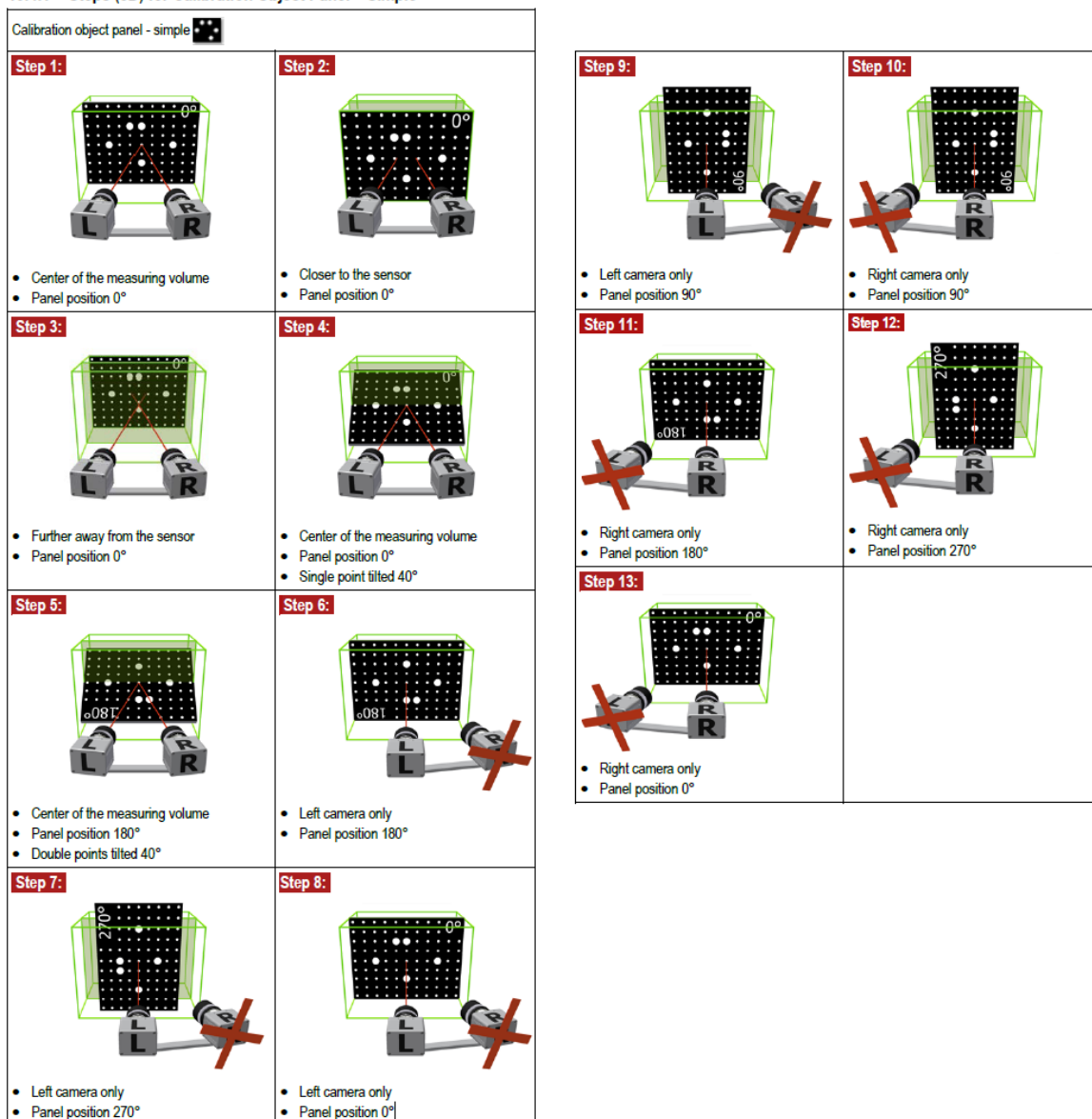


Obr. 29 Průběh kalibrace v laboratoři ÚADI.

Kalibrační postup zahrnoval 13 předem definovaných poloh v přesném pořadí viz obr. 30. Výchozí výšková poloha činila 685 mm a následující dvě polohy byly vzdáleny ± 100 mm. Referenční hodnota byla přibližně změřena jako vzdálenost od základny uchycení kamer po záda jezdce sedícího na stroji.

Posloupnost kalibračního procesu byla následující: po natočení panelu i kamer do požadované polohy – obr. 29, byl za asistence doktora Jana Fojtáška zkontrolován obraz jednotlivých kamer na dvou mobilních telefonech za použití zmíněné aplikace Gopro Quik a následovalo pořízení krátkého videa. Pracovní prostor byl po celou dobu dodatečně externě osvětlen, aby bylo dosaženo co nejkvalitnějších podmínek snímání. Tímto způsobem bylo vytvořeno všech požadovaných 13 poloh.

10.4.1 Steps (3D) for Calibration Object Panel – Simple



Obr. 30 Schéma jednotlivých kalibračních kroků včetně jejich popisů.

Následovalo převedení pořízených videí na jednotlivé snímky pomocí programu VLC media player nebo použitím programu GOM Correlate, který z nich vytvořil černobílé snímky. Rozdělení bylo tedy na 13 pozic, vždy na levou a pravou kameru. Z každé složky bylo nutné ručně vybrat referenční snímek, čímž vznikla sada 13 párů fotek.

Na základě těchto snímků bylo možné přistoupit k vytvoření 3D kalibračního souboru kamer viz obr. 31. Po vybrání kalibračního souboru (*.calobj) použitého panelu a nasnímané sady snímků se program pokusí vytvořit soubor. Pro úspěšné vytvoření souboru je nutné mít použitelných minimálně 12 ze 13 pozic, ale ani tento požadavek ještě není zárukou úspěchu viz obr. 33. Nejlepšího výsledku se podařilo dosáhnout s odchylkou 0,289 pixelu. I když byla tato odchylka větší než defaultně nastavený limit, požadovaný soubor se podařilo vytvořit.

3D Calibration From Image Series

?

×

Calibration results

Calibration deviation

×

General

Calibration date

Fri May 7 15:03:13 2021

Calibration object

Object type

Panel (Triple Scan)

Name

CP40-560-62417

Calibration points

3657 points

Certified lengths

907.134 / 907.062 mm

Certification temperature

20.0 °C

Expansion coefficient

22.67 x 10⁻⁶ K⁻¹

Calibration temperature

20.0 °C

Calibration settings

Camera lenses

3.00 mm

Ellipse quality

0.8

Calibration Result

Calibration deviation

0.289 Pixels

Calibration deviation (check)

Not OK (limit value: 0.100 Pixels)

Camera angle

21.1°

Height variance

278 mm

Measuring volume

1540 / 1005 / 1005 mm

13 of 13 image pairs are used for the calibration.

Calibration saved under "D:/škola/diplomka/kalibrace_9.4.2021/kalibrace_10.4._v3.calib"

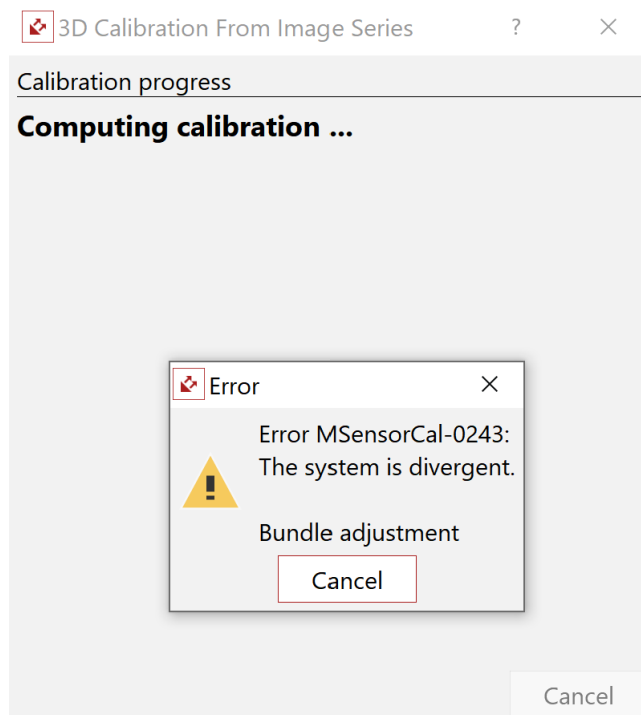
Obr. 31 Výstupní data z provedené kalibrace GoPro kamer.

Pro potřeby kalibrace byla vymodelována a na 3D tiskárně vytištěna pomůcka zobrazena na obr. 32. Jedná se o plastový skelet s prostorem pro vsunutí laserového ukazovátka. Celý skelet je nasunut na kameru bez nutnosti složitější montáže. Hlavní myšlenkou bylo nalézt přibližný střed os záběrů obou kamer, případně sjednotit úhel uchycení kamer nebo dokonce změnit vzdálenost základny mezi kamerami.



Obr. 32 Plastový skelet k uchycení laserového ukazovátka.

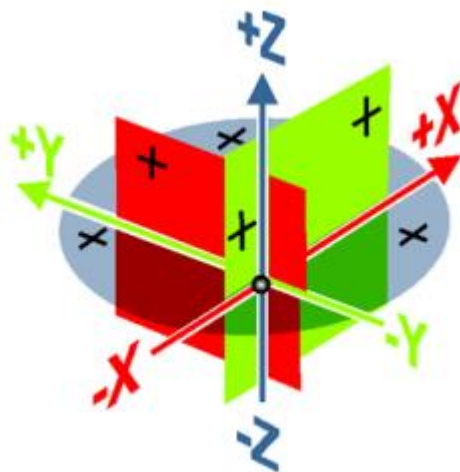
Celkově je celý proces kalibrace značně neintuitivní, komplikovaný a zdlouhavý. Důvodem je až zpětné zjišťování, zda provedená kalibrace byla úspěšná. Ani po provedení všech úkonů zde není záruka úspěšného vytvoření kalibračního souboru, jedná se tedy o časově náročný proces. Příkladem může být pokus zobrazený na obr. 33, kdy bylo všech 13 snímků akceptováno, ale konečný soubor se nepodařilo vytvořit kvůli divergenci souřadného systému.



Obr. 33 Neúspěšný proces kalibrace kamer.

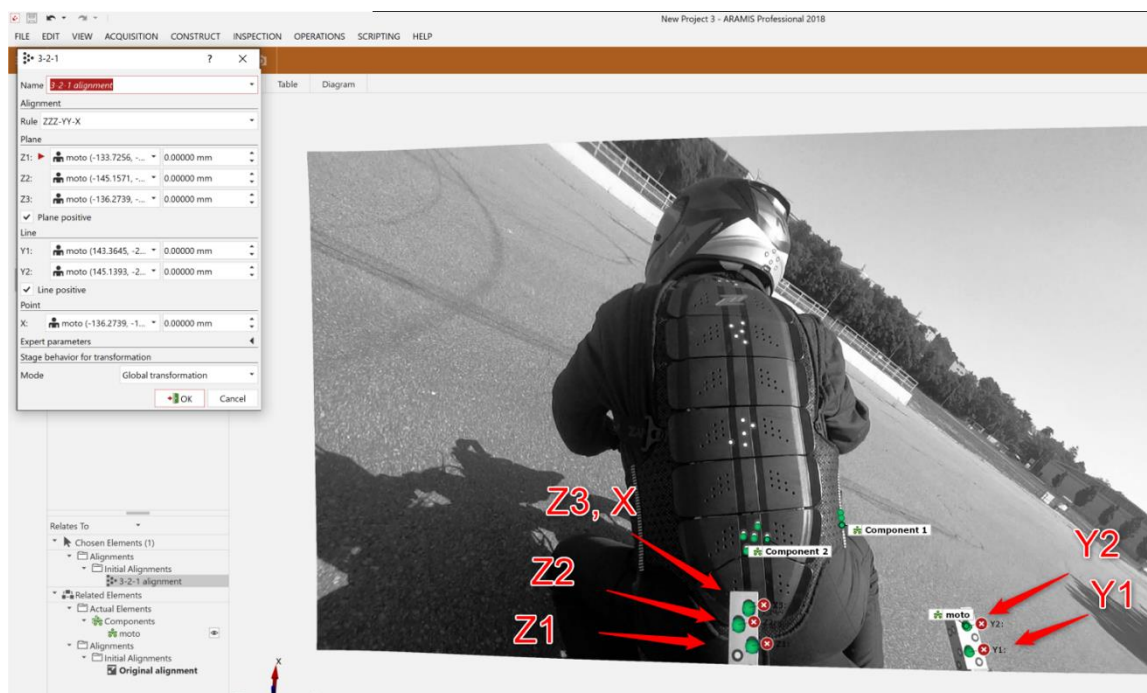
3.2.4 SOUŘADNÉ SYSTÉMY

Aby bylo vůbec možné referenční body vyhodnocovat, bylo nutno definovat vztažnou sestavu. Program GOM Correlate si defaultně nastaví svůj souřadný systém, který nepředstavuje žádný problém až do doby, kdy je žádoucí vyhodnotit referenční body nejen ve vztahu mezi sebou apod. ale i vůči souřadnému systému celého stroje. Defaultně nastavený souřadný systém není možné na základě čeho zpětně definovat, a je tedy pro komplexní vyhodnocení nevhodný. Toto zjištění vedlo k vytvoření vlastního externího souřadného systému, který by měl být viditelně umístěn na motocyklu. Na každou stranu přídavného hliníkového rámu byl proto připevněn hliníkový plech s nalepenými referenčními body – referenční prvek. Body musí být viditelné a s dostatečnou roztečí mezi sebou, aby vyhodnocení bylo přesnější. Vytvoření centrálního souřadného systému pro vyhodnocování pohybu jezdce bylo vytvořeno pomocí zarovnání 3-2-1, kdy je rovina vytvořena pomocí 3 bodů, další 2 body tvoří přímku a 1 bod reprezentuje počátek souřadného systému, obr. 34.



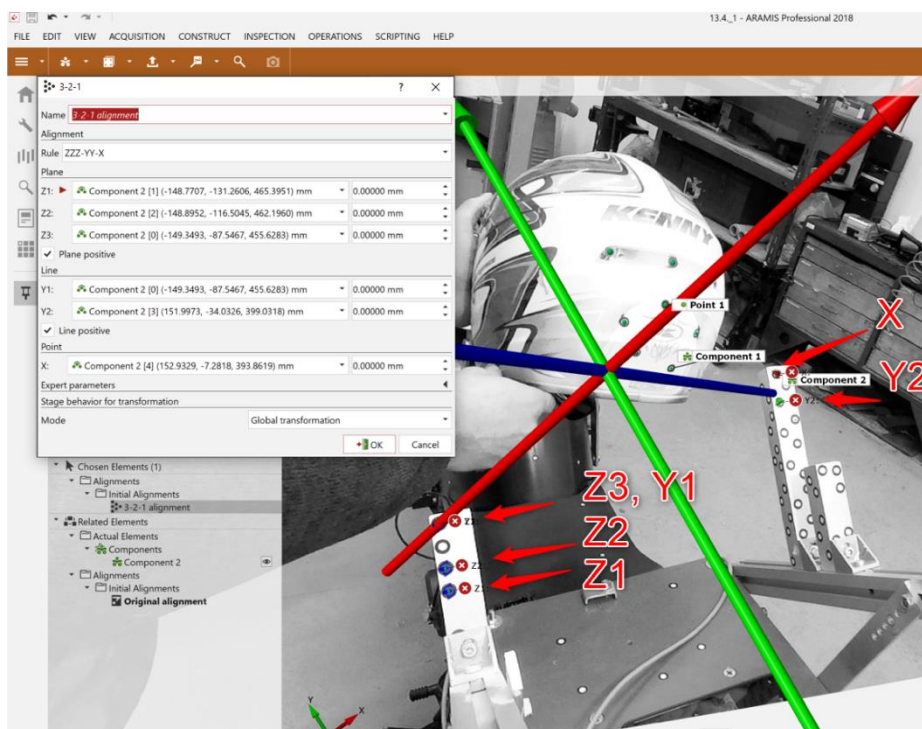
Obr. 34 Princip vytvoření souřadného systému 3-2-1 [42].

První varianta rozestavění referenčních prvků, zobrazena na obr. 35, se později ukázala jako nepříliš vhodná. Bodů bylo málo, byly umístěny příliš nízko a chaoticky. Nicméně již bylo provedeno několik experimentálních měření a testovacích jízd, proto ve snaze nezhodnotit pořízené materiály bylo rozhodnuto naskenovat tuto konfiguraci, viz kapitola 3.2.5, a použít pro následné vyhodnocení.



Obr. 35 Původní varianta rozestavení souřadného systému.

Na základě poznatků z první varianty byla vytvořena druhá, která už měla lépe reflektovat získané poznatky. Byl přidán jeden prvek navíc, body byly znovu přelepeny do zřetelnějšího rozestavení a vše bylo posunuto výše. Výsledný souřadný systém lze vidět na obr. 36.



Obr. 36 Varianta č.2 rozestavení souřadného systému.

3.2.5 3D SKENOVÁNÍ

V experimentální části pro skenování referenčních bodů byl použit 3D skener s označením ATOS Compact Scan 2M od výrobce GOM, obr. 37. Jedná se o mobilní skener, který je předurčen pro celoplošné měření a inspekci. Tento skener patří do kategorie bezkontaktních optických skenerů využívajících k vyhodnocení povrchu strukturované světlo. Sestava se skládá z projektoru, dvou kamer a řídicí jednotky. Díky nastavitelné velikosti záběru je možné skenovat předměty o malých rozměrech až po velké plochy do velikosti 1 200 mm².

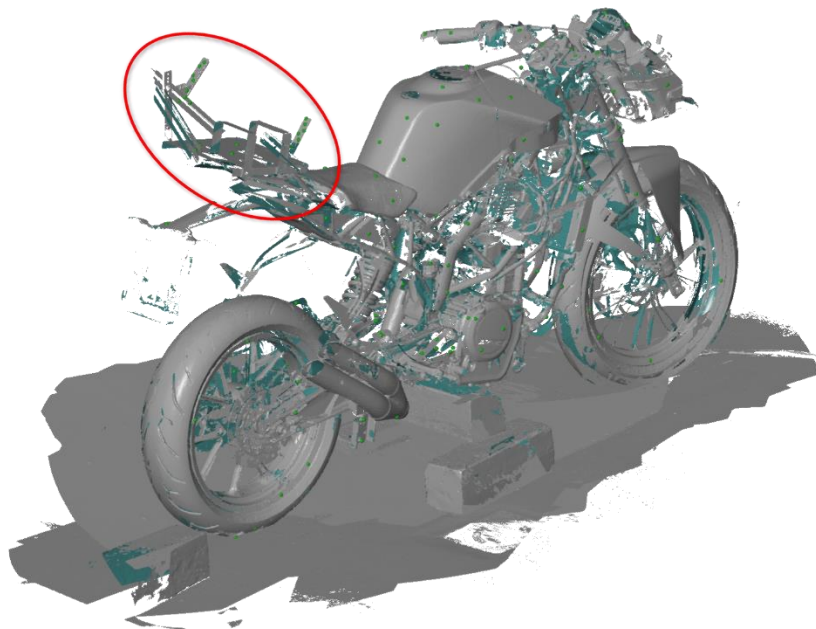
Parametry [43], [44]:

- Rozlišení 8 – 12 Mpx
- Rychlost skenování cca 1 s
- Nastavení vzdálenosti pomocí laserů
- Provozní teplota 5°C – 40°C
- Přesnost až 0,05 mm
- Spojení přes gigabit Ethernet
- Hmotnost cca 4 kg
- Operační systém Windows 10



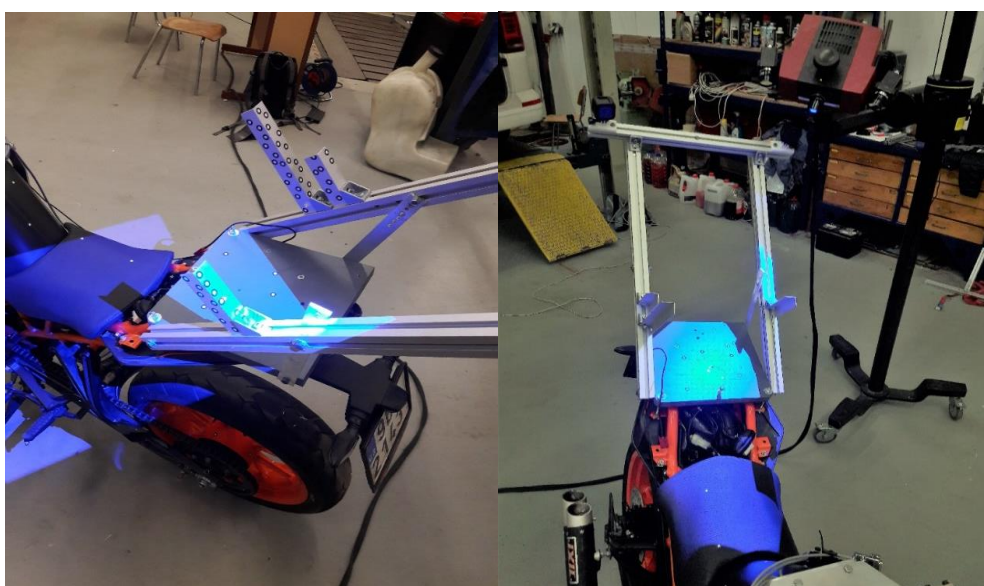
Obr. 37 GOM ATOS Compact Scan 2M [43].

Stávající 3D sken motocyklu vycházející z předešlé diplomové práce Ing. Tobiáše neodpovídal aktuálnímu stavu stroje, jelikož v 3D modelu chyběl hliníkový rám uchycený na podsedadlovém rámu. Bylo tedy nutné jej doplnit tak, aby odpovídal aktuálnímu stavu, obr. 39.



Obr. 38 Dodatečně skenovaná část motocyklu

Před samotným začátkem měření byl skener zkalibrován pro co nejpřesnější měření pomocí příslušného kalibračního panelu. Postup a směr skenování byl od již nasnímaných částí po nové součásti. Nejdříve bylo nutné naskenovat části, kde byli již z minulosti nalepeny referenční body, a až poté přidáváním dalších bodů pro napojení snímků přejít k zadní části rámu, obr. 38. Tento postup byl nutný pro následné doplnění stávajícího skenu a přesné zarovnání.



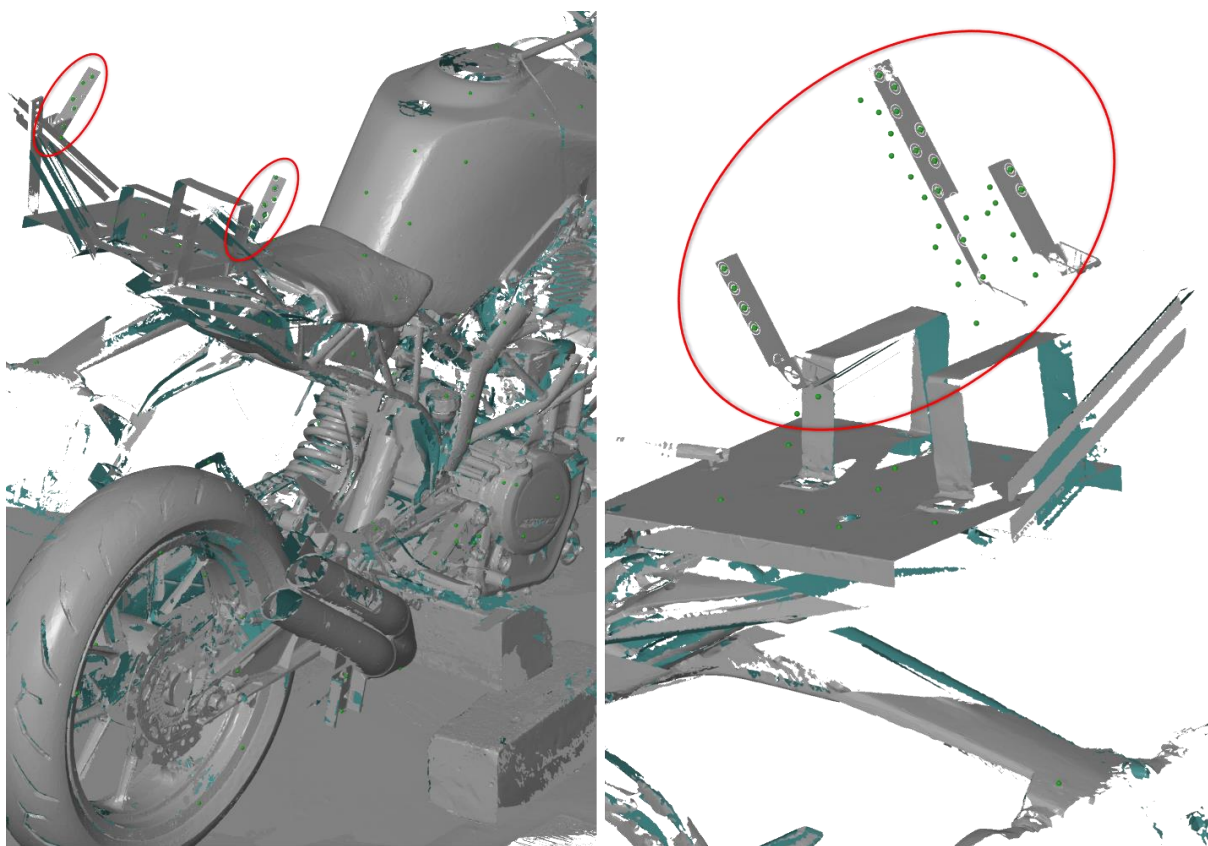
Obr. 39. Průběh skenovacích prací na motocyklu.

Nekódované referenční body byly nalepeny v zadní části motocyklu na přídavném hliníkovém rámu. Z preventivních důvodů byl povrch rámu v blízkosti bodů nastříkán křídovým sprejem pro zlepšení snímání, resp. zhoršení odrazivosti. Křídový sprej je jedním z nejpoužívanějších matricích prášků. Velikost referenčních bodů byla zvolena s průměrem 5 mm.

Celý průběh digitalizace bylo možné neustále sledovat na obrazovce počítače, takže uživatel viděl přesně úhel záběru a počet snímaných referenčních bodů včetně toho, zda v průběhu měření nedošlo k pohybu kamery či stroje, a není tedy nutné měření opakovat.

3D skener je ve vlastnictví Ústavu automobilního a dopravního inženýrství (dále jen ÚADI), celý proces 3D skenování probíhal v laboratořích ÚADI na FSI.

Následné zpracování a vysítování naskenovaných povrchů bylo zrealizováno v prostředí programu GOM ATOS Professional. Samotné rozšíření 3D modelu bylo provedeno v programu GOM Inspect, přičemž samotné skenování bylo provedeno dvakrát. Poprvé s původními referenčními body (obr. 40a), se kterými již byly zaznamenány některé testovací pokusy včetně jízdy, a poté s hliníkovým rámem rozšířeným o další referenční prvek (obr. 40b). Tato změna proběhla kvůli nalepení více bodů a také směru nalepení tak, aby přibližně korespondoval se směry os globálního souřadného systému motocyklu.



Obr. 40 Pohled na skenované části: a) původní rozložení referenčních prvků, b) nové rozložení referenčních prvků.

4 REALIZACE MĚŘENÍ

S cílem ověřit funkčnost navrženého měřicího řetězce bylo provedeno několik experimentálních měření na. Úkolem bylo nalézt případné nedostatky a detailněji je popsat. Testování se uskutečnilo na více místech:

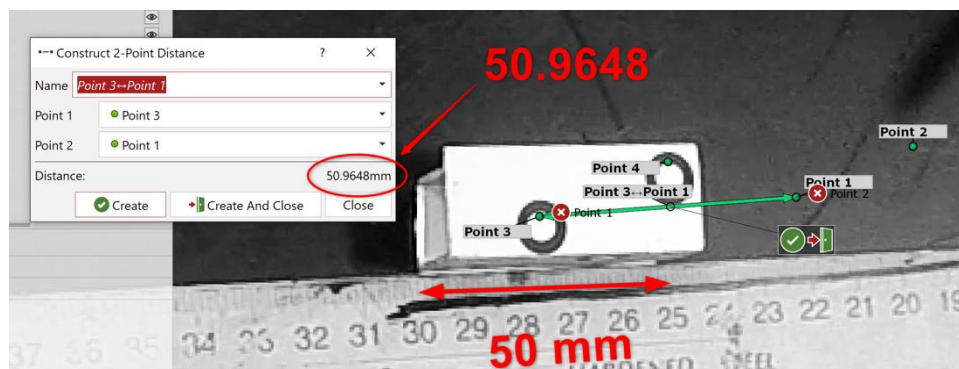
- Laboratoře ÚADI
- Areál FSI
- Brněnské veletržní výstaviště

Posloupnost měření směřovala od laboratorních podmínek po testovací jízdy v praxi.

4.1 OVĚŘENÍ PŘESNOSTI KAMER

Pro zpětnou kontrolu, zda jsou kamery správně zkalibrovány, respektive dosahují přijatelné přesnosti, která je v řádu desetin milimetru případně jednotek milimetrů, bylo provedeno několik měření.

První měření spočívalo v porovnání změřené vzdálenosti v programu GOM Correlate s realitou. V laboratoři byl na rovnou plochu umístěn objekt s nalepenými referenčními body a byl posunut o předem známou hodnotu. Posun byl orientačně měřen pomocí pravítka tvaru L. Realizovaný posun byl přibližně 50 mm. Po zpracování nasnímaných dat byla v programu odměřena vzdálenost posunu bodů odpovídající hodnotám 50,965 mm a 51,325 mm, obr. 41. Vzhledem k použitému měřicímu prvku a samotnému posunu se jednalo spíše o hrubou kontrolu a ujištění, že se kalibrace ubírá správným směrem.



Obr. 41 Porovnání vzdálenosti posunu v programu Correlate s realizovaným posunem.

Druhé měření už proběhlo pouze v programech GOM, jelikož k dispozici byl aktuální 3D sken motorky s možností zobrazení referenčních bodů. Postup byl následující: pomocí funkce odměření absolutní vzdálenosti dvou bodů byla odečtena vzdálenost ze dvou vybraných míst na stroji. Odpovídající protihodnoty vzdálenosti stejných bodů byly následně zjištěny z video záznamu kamer, kdy hodnoty byly odečteny za pomoci stejné funkce.



Obr. 42 Zjištěná vzdálenost z kamer GoPro (snímek nahoře) a vzdálenost z naskenovaného 3D modelu motocyklu (snímek dole).

Na základě kalibrace a mnohem vyšší přesnosti skenovacího zařízení ATOS byly zjištěné vzdálenosti z 3D modelu brány jako referenční a vůči nim pak byly hodnoty z videa porovnávány, obr. 42. Zjištěné odchylky činily 0,052 mm a 0,32 mm, tímto krokem tedy byla správnost kalibrace experimentálně ověřena.

4.2 POHYBY PŘILBY

Dalším krokem bylo pokusit se snímat dynamicky se pohybující předmět v prostoru. V tomto případě to byla přilba jezdce, na kterou byly náhodně nalepeny referenční body, obr. 43. Měření se uskutečnilo dne 5. 8. 2020 v prostorách laboratoře C1 ÚADI. Cílem bylo seznámit se s prostředím a prací v programu GOM Correlate a ověření, zda jsou světelné podmínky dostačující. Kamery dokázaly snímat pohyb přilby téměř po celé trajektorii kromě krátkého úseku, kdy z neznámých příčin program nedokázal vyhodnotit dané body. Výsledek měření byl tedy hodnocen přijatelně a bylo možné na něj navázat.



Obr. 43 Průběh testování pohybu přilby v laboratořích ÚADI.

4.3 AREÁL FSI

Další fáze testování navazující na měření pohybu přilby bylo provedeno dne 6. 8. 2020. Jednalo se o testovací jízdy uvnitř areálu FSI a obecně první použití měřicí sestavy mimo laboratoř. Cílem bylo konfrontovat navrženou měřicí sestavu s reálnými podmínkami provozu. Testovacím jezdce byl zvolen doktor Lubor Zháňal, vlastník použitého testovaného motocyklu. Již na úvod byl pozitivně hodnocen rozsah snímání natočení přilby, kde maximální



Obr. 44 Snímek z průběhu testování zobrazující maximální snímatelné natočení přilby.

vyhodnocené otočení je možné vidět na obr. 44. Poté už však následovaly celé řady sérií snímků, jenž program nedokázal vyhodnotit a byly tedy nepoužitelné. Příčin mohlo být několik: špatná synchronizace, kvalita povrchu vozovky, nedostatečná tuhost přídatného rámu, typ použitých obrazových snímačů či samotný chod motoru.

4.4 BRNĚNSKÉ VELETRŽNÍ VÝSTAVIŠTĚ

Na základě zjištěných poznatků z předchozích testování se další měření uskutečnilo v areálu Brněnského výstaviště, které poskytuje dostatečný prostor pro bezpečné provedení různých manévrů a jízdních situací. Toto měření se uskutečnilo dne 12. 8. 2020 za pomoci inženýra Martina Tobiáše a doktora Lubora Zháňala. Bylo provedeno mnoho testovacích jízd ve snaze simulovat různé jízdní situace, přes konstantní jízdu v kruhu, průjezd zatáčkou až po dojezdovou zkoušku, obr. 45. Mimo pár úseků zde byl kvalitnější povrch ve srovnání s areálem FSI a díky volnému prostoru zde byly lepší světelné podmínky.



Obr. 45 Ukázka prováděných jízdních situací.

Poloha snímání jezdce byla rozšířena o páteřový chránič, obr. 46. Stejně jako přilba, má rovněž chránič vhodnou geometrii a viditelnost pro umístění referenčních bodů. V neposlední řadě se jedná o tuhý prvek, tedy nedochází k deformaci mezi jednotlivými body, ale pouze články chrániče.



*Obr. 46 Pohled na páteřový chránič
s umístěnými referenčními body.*

4.5 LABORATOŘ FSI – POHYB PŘILBY

Následkem manipulace s motocyklem, již mimo proces testování, došlo k poškození jednoho z plastových úchytů GoPro kamer. Samotná nehoda ukázala slabiny použitého konstrukčního řešení, kdy upevněné kamery nejsou nijak účinněji chráněny proti vychýlení z nastavené polohy v případě neodborné manipulace nebo kontaktu cizího předmětu následkem nehody. Jelikož tato nehoda se stala na samém konci práce a nebylo již možné uskutečnit testovací jízdy s motocyklem, bylo rozhodnuto, že poslední test se uskuteční opět v laboratoři ÚADI s pokusem navázat na poslední měření, obr. 47.

Bylo nutné opět provést kalibrační proceduru a uvést kamery do měřitelného stavu. Poté byla sestava umístěna na motocykl a místo pohybu jezdce zde bylo simulováno pohybu přilby podobně jako v kapitole 4.2. Rozsah pohybu přilby zde však byl mnohem rozsáhlejší včetně rotací. Toto se uskutečnilo dne 13. 4. 2021.

Po následném vyhodnocení pořízených dat byl tento pokus vyhodnocen jako nejúspěšnější ze všech provedených, kdy program až na výjimky dokázal rozpoznat všechny body umístěné na přilbě během celé trajektorie pohybu. Zmíněná vyhodnocená data byla základním prvkem pro navazující analýzu.



Obr. 47 Snímek z průběhu měření pohybu přilby.

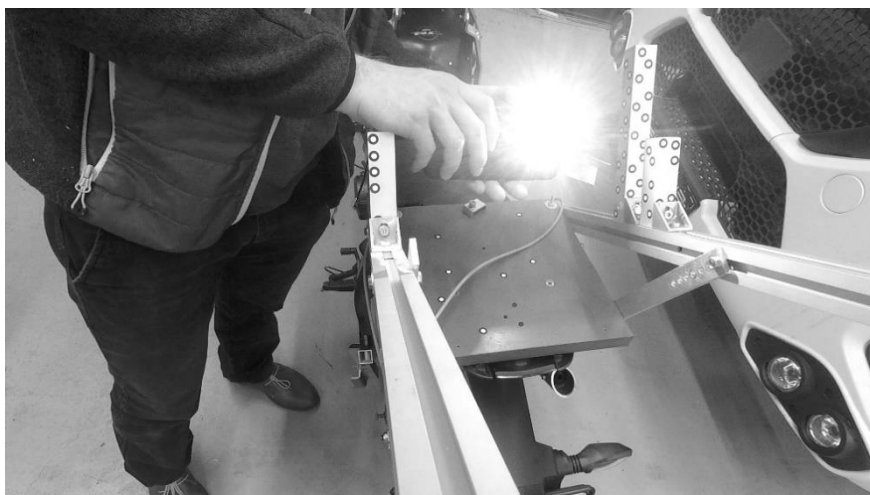
5 ZPRACOVÁNÍ DAT

Pořízení video záznamů z jízdy na motocyklu je jen část z procedury nutné k získání finálních výsledků. Obsah těchto kapitol bude věnován náplní práce v softwarech potřebných k úpravám získaných materiálů (GOM Correlate) a následné jejich interpretaci (ADAMS).

5.1 GOM CORRELATE

Dalším krokem je zpracování videí tak, aby na konci této části procesu byly 3D souřadnice pozic jednotlivých bodů v závislosti na čase. Tato část je kompletně zpracována v prostředí programu GOM Correlate.

Každé video bylo samostatně nahráno do programu a automaticky rozčleněno na jednotlivé snímky podle frekvence nahrávání, tedy 24 fps. Pro následnou synchronizaci byla těsně po zapnutí nahrávání pořízena fotografie s bleskem, kde se blesk fotoaparátu zobrazí pouze na jediném snímku, který tedy sloužil jako referenční bod, od kterého se dále vyvíjí postup a číslování snímků, obr. 48.



Obr. 48 Pohled na synchronizační bod vytvořený bleskem fotoaparátu.

Následně byla pozornost přeměřována na dílčí segmenty, v nichž byl potenciál pro vyhodnocení pozice jezdce, zbylé segmenty snímků byly odstraněny. Poté byla daná oblast vyexportována jako černobílé snímky ve formátu *.tiff. Stejný postup byl použit i při zpracování z pravé kamery.

Dalším krokem bylo opětovné nahrání obou již zarovnaných sad snímků spolu s vytvořeným kalibračním souborem kamer *.calib, který byl výsledkem samostatné kalibrace kamer popsané v kapitole 3.2.3. Nejdříve bylo nutné definovat typ použitých referenčních bodů v záložce *Acquisition Parameters* na velikost 5 mm. Poté byly vytvořeny komponenty na základě nalepených referenčních bodů, kdy se pomocí funkce *Create Point Component* označily všechny body reprezentující danou komponentu. Zeleně byly označeny body, které program dokázal rozpoznat, zbylé body bylo nutné ručně označit v obou pohledech kamer. Pro vytvoření

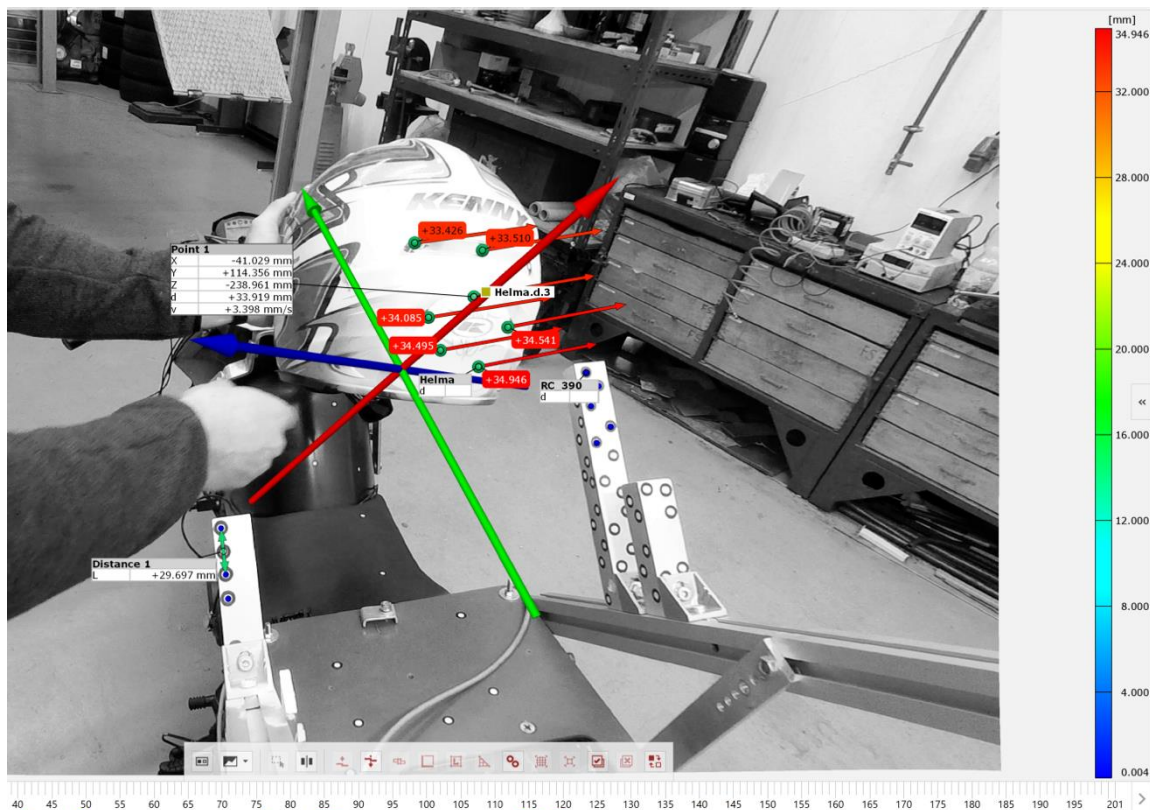
jakékoliv komponenty jsou zapotřebí minimálně 3 body, ale doporučuje se použít 5 bodů [42]. Je možné volit typ komponenty mezi tuhou nebo deformovatelnou. V případě tuhé varianty se zvolené body nemohou relativně pohybovat vůči sobě, zatímco u deformovatelné varianty je relativní pohyb bodů vůči sobě možný.

Po vytvoření všech potřebných komponent bylo nutné definovat požadovaný souřadný systém, a to rovněž na základě referenčních bodů. Zde byl souřadný systém vytvořen pomocí hliníkových plechů s body umístěnými na motorce. Komponentě motocykl byla přiřazena funkce tuhého tělesa, vůči kterému jsou všechny posuny porovnávány. Během celé práce jsou všechny úkony automaticky přepočítávány na všechny snímky. V případě, že některý bod nebo komponentu není možné vyhodnotit, je daný snímek na časové ose zvýrazněn.

Parametry, které je možné vyhodnotit, jsou např.:

- Celková vzdálenost mezi body
- Změna vzdáleností mezi body
- Posun každého bodu
- Rychlost každého bodu
- Zrychlení každého bodu

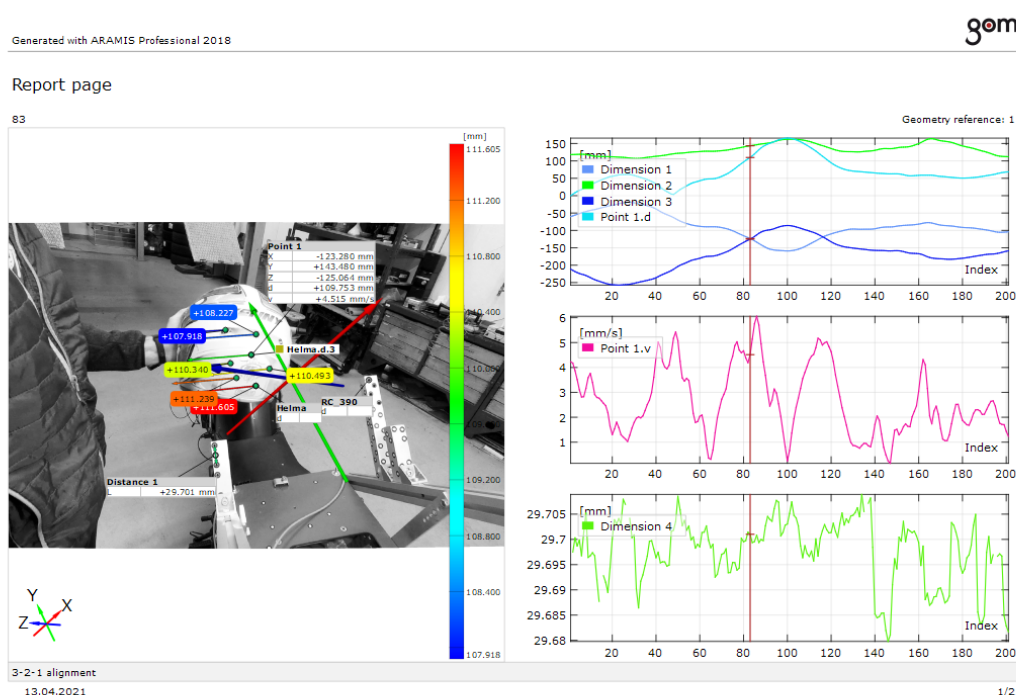
Jakýkoliv z těchto parametrů lze specifikovat i na jednotlivé osy bodu.



Obr. 49 Prostředí programu GOM Correlate a průběh zpracování.

Během práce v programu bylo možné průběžně sledovat postup zpracování, kdy posunem po časové ose se zobrazovaly aktuální hodnoty na každém snímku včetně jednotlivých vektorů, obr. 49.

Na základě vytvořeného projektu je možné sestavit výstupní report obsahující grafy, tabulky či videa z provedené analýzy. Názorný report, vytvořený z dat testování pohybu přilby, je zobrazen na obr. 50.



Obr. 50 Výsledný report z provedení měření pohybu přilby.

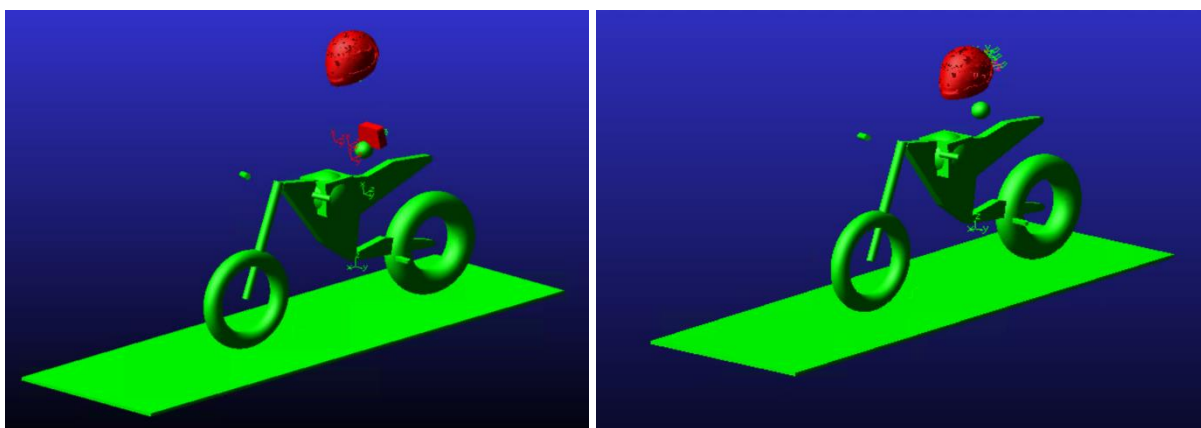
Dalším možným výstupem dat může být tabulkový soubor ve formátu *.csv obsahující informace jednotlivých snímků. V tomto případě jsou to souřadnice jednotlivých bodů dané komponenty vůči použitému souřadnému systému podle posloupnosti každého snímku. Tabulkový soubor je zobrazen na obr. 51.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	name	type	attribute	id	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2			time		0.0000	0.0417	0.0833	0.1250	0.1667	0.2083	0.2500	0.2917	0.3333	0.3750
3	Helma	geometry	num_points		7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
4	Helma	geometry	pointx	0	-52.34	-50.33	-48.26	-46.22	-44.21	-42.35	-40.49	-38.86	-37.10	-35.40
5	Helma	geometry	pointy	0	182.05	181.97	182.03	182.30	182.50	182.81	182.74	182.12	181.08	179.70
6	Helma	geometry	pointz	0	-160.28	-163.80	-167.08	-169.98	-172.51	-174.66	-176.65	-178.87	-181.63	-184.70
7	Helma	geometry	pointx	1	-23.24	-21.25	-19.08	-16.88	-14.71	-12.58	-10.52	-8.67	-6.88	-5.30
8	Helma	geometry	pointy	1	157.57	157.71	157.93	158.22	158.48	158.64	158.50	157.82	156.75	155.20
9	Helma	geometry	pointz	1	-204.85	-208.50	-211.87	-214.65	-217.09	-218.99	-220.86	-222.90	-225.64	-228.70
10	Helma	geometry	pointx	2	-50.22	-48.19	-46.01	-43.76	-41.62	-39.55	-37.40	-35.60	-33.87	-32.40
11	Helma	geometry	pointy	2	128.11	128.17	128.38	128.66	128.94	129.11	128.85	128.16	127.15	125.70
12	Helma	geometry	pointz	2	-201.24	-204.95	-208.44	-211.29	-213.89	-215.83	-217.61	-219.77	-222.58	-225.70
13	Helma	geometry	pointx	3	-97.92	-95.75	-93.40	-91.12	-88.92	-86.86	-84.70	-82.93	-81.24	-79.90
14	Helma	geometry	pointy	3	106.94	106.84	106.81	106.97	107.12	107.26	106.91	106.22	105.23	104.00
15	Helma	geometry	pointz	3	-192.40	-196.04	-199.49	-202.42	-205.10	-207.11	-209.05	-211.38	-214.25	-217.40
16	Helma	geometry	pointx	4	-83.77	-81.68	-79.37	-77.19	-75.09	-73.11	-71.00	-69.39	-67.58	-66.10
17	Helma	geometry	pointy	4	128.93	128.84	128.79	128.99	129.17	129.38	129.11	128.51	127.42	126.20
18	Helma	geometry	pointz	4	-175.34	-178.98	-182.37	-185.32	-187.91	-190.00	-191.86	-194.23	-196.99	-200.10
19	Helma	geometry	pointx	5	-57.79	-55.66	-53.35	-51.01	-48.65	-46.48	-44.10	-42.14	-40.46	-39.00
20	Helma	geometry	pointy	5	108.34	108.47	108.70	108.93	109.13	109.21	108.79	108.06	107.05	105.60
21	Helma	geometry	pointz	5	-249.56	-253.27	-256.77	-259.64	-262.15	-264.16	-265.90	-268.08	-271.00	-274.10
22	Helma	geometry	pointx	6	-95.53	-93.51	-91.06	-88.68	-86.30	-84.06	-81.83	-79.89	-78.22	-76.90
23	Helma	geometry	pointy	6	91.55	91.62	91.66	91.81	91.92	91.90	91.56	90.79	89.79	88.50
24	Helma	geometry	pointz	6	-236.44	-240.24	-243.72	-246.65	-249.26	-251.26	-253.18	-255.51	-258.41	-261.50

Obr. 51 Výřez z tabulky vyhodnocených prostorových souřadnic jednotlivých bodů.

5.2 ADAMS

Pro vytvoření zpětné simulace jízdy byl zvolen software ADAMS (Automatic Dynamic Analysis of Mechanical Systems) od společnosti MCS Software, který se řadí mezi nejpoužívanější a nejpracovnější programy pro multi-body simulace na světě. Součástí je grafické rozhraní umožňující modelovat celé mechanické sestavy. Software poskytuje simulaci a analýzu mechanických sestav, které mohou být složeny z tuhých i pružných těles, jež mohou být mezi sebou spojeny kinematickými vazbami různých typů a následnou jejich optimalizaci.

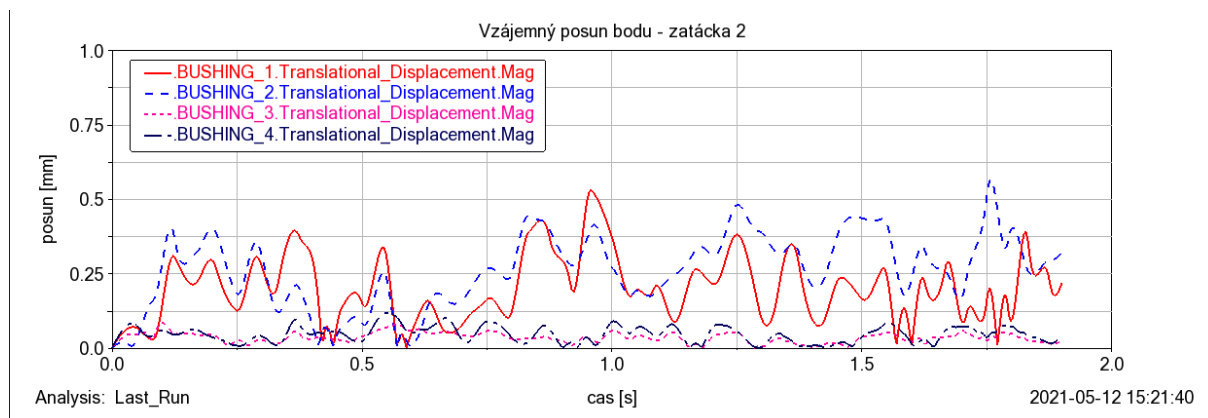


Obr. 52 Vytvořené multi-body modely v softwaru ADAMS.

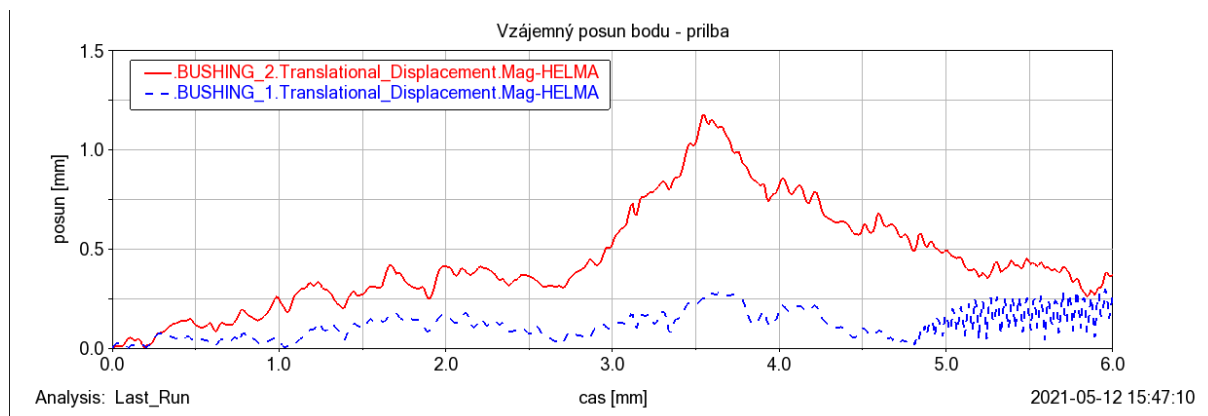
Tento multi-body program je možné rozšířit o mnoho nadstavbových modulů, které jsou již konkrétněji zaměřeny na danou oblast a problematiku. Příkladem může být Adams Car, Adams View či Adams Aircraft [45].

Základním podkladem pro vytvoření simulace byl multi-body model motocyklu, jež byl převzat z práce Ing. Martina Tobiáše [46]. Přesný 3D model použité přilby při měření se bohužel nepodařilo vytvořit, tudíž byl použit pouze ilustrativní 3D model. Stejně tak i páteřový chránič byl vytvořen jako těleso přímo v prostředí programu Adams. Jako vstupní data byly použity hodnoty souřadnic bodů vygenerovaných z programu GOM Correlate, které byly příslušně upraveny pro následné použití. Referenčním prvkem všech hodnot byl čas. Pro reprezentaci každého předmětu byly vybrány 3 body. Jako výchozí pozice jednotlivých bodů byla stanovena počáteční souřadnice a další posun už byl pouze na základě rozdílu souřadnic. Pohyb všech bodů byl definován pomocí funkce *Akima fitting method (AKISPL)*, která podle tabulky vstupních parametrů vytvořila potřebný spline.

Vytvořit jednotlivé předměty pouze na základě těchto 3 bodů je nemožné kvůli nepřesnostem měření a případné zaokrouhlovací chybě. Body byly proto mezi sebou spojeny pomocí funkce *Bushing*, díky které bylo možné právě sledovat tyto nepřesnosti. Ze tří bodů byl vybrán jeden jako hlavní, vůči kterému byly aplikovány *Bushingy* ostatních dvou bodů. Názorné dva grafy jsou zobrazeny na obr. 53 a 54, kde je znázorněna maximální velikost posunů mezi body.



Obr. 53 Vyhodnocení vzájemných posunů bodů při samostatném pohybu přilby.



Obr. 54 Vyhodnocení vzájemných posunů bodů během zatáčení.

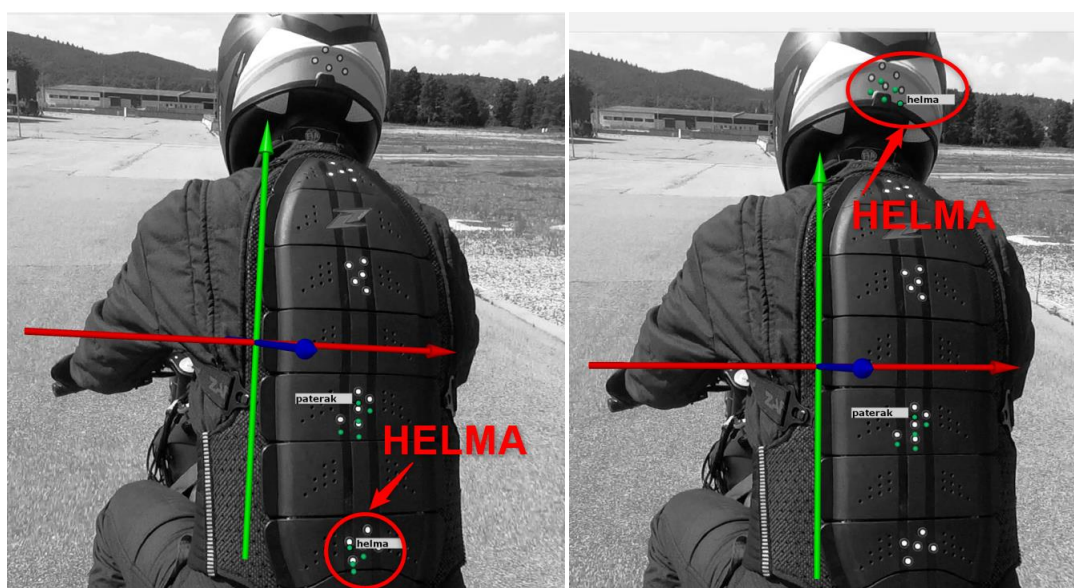
Ve snaze o eliminaci výše zobrazených odchylek bodů mezi sebou byl realizován pokus s ruční úpravou souřadnic jednotlivých bodů v tabulkovém procesoru Excel. Z-souřadnice dvou bodů byly upraveny, aby celková vzdálenost mezi body 1-2 a 1-3 byla konstantní. Přestože byl výpočet správný a vzdálenosti se neměnily, analýza posunu mezi jednotlivými body zobrazila nenulové hodnoty v řádech desetin mm. Zmíněná odchylka je s největší pravděpodobností způsobena použitou funkcí *AKISPL*, která aproximuje zadané vstupní souřadnice jednotlivých bodů v čase. Do budoucna je proto nutné počítat s těmito odchylkami a pokusit se zmapovat detailně funkci *AKISPL*, případně naměřená data zprůměrovat či vytvořit vhodný algoritmus pro aproximaci zadávaných dat.

6 DISKUZE

6.1 ANALÝZA CHYB

Při aplikaci snímací sestavy v praxi se u snímání jezdce během jízdy na motocyklu vyskytly chyby, které se při měření v laboratorních podmínkách neprojevily. Většina z nich je spojena s nežádoucími otřesy či měnící se kvalitou povrchu vozovky.

Během testování v areálu FSI a BVV se projeví chyby, respektive nedostatky při následné úpravě a počítačovém zpracování. Často se stávalo, že program nedokázal adekvátně vyhodnotit pořízené snímky, kdy nejspíše v důsledku převedení snímků na černobílý obraz vyhodnotil referenční body díky kontrastu na zcela odlišných pozicích. Někdy se referenční body nacházely mimo svou pozici, ale stále na stroji (obr. 55), popř. i zcela mimo stroj na vedlejších objektech (obr. 56). Další nepřesností byly rozostřené snímky, kde program nedokázal identifikovat, zda se jedná či nejedná o referenční body. Vybrané snímky názorně prezentují zmíněné chyby.



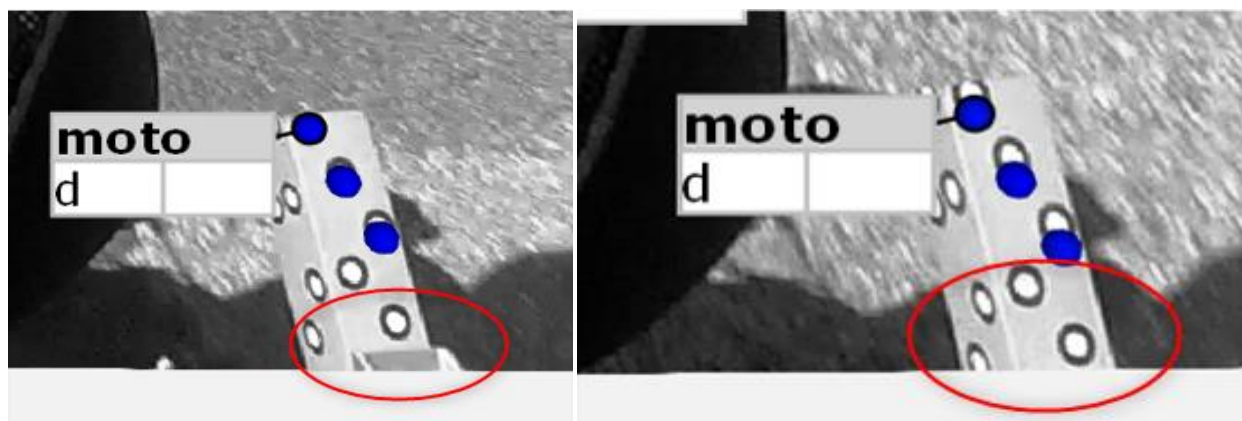
Obr. 55 Vyhodnocení referenčních bodů přilby na zcela odlišných pozicích.



Obr. 56 Vyhodnocení referenčních bodů mimo původní lokaci na vedlejších objektech a pozicích jezdce.

Nejvíce ovlivnil kvalitu nasnímaného záznamu chod jednoválcového motoru, jehož vibrace vedené celým rámem motocyklu způsobily kmitání přidavného rámu, na němž byly uchyceny snímané kamery, a tím docházelo ke zkreslování obrazu. V případech, kdy se motor nacházel ve středním pásmu otáček, program byl stále schopen kvalitně vyhodnocovat body. Naopak v režimu volnoběžných a maximálních otáček byl obraz už tak znehodnocen, že jej nebylo možné vůbec vyhodnotit. Byla zde snaha provizorně vyztužit hliníkový rám pomocí textilního popruhu, ale toto řešení se ukázalo jako nepříliš účinné.

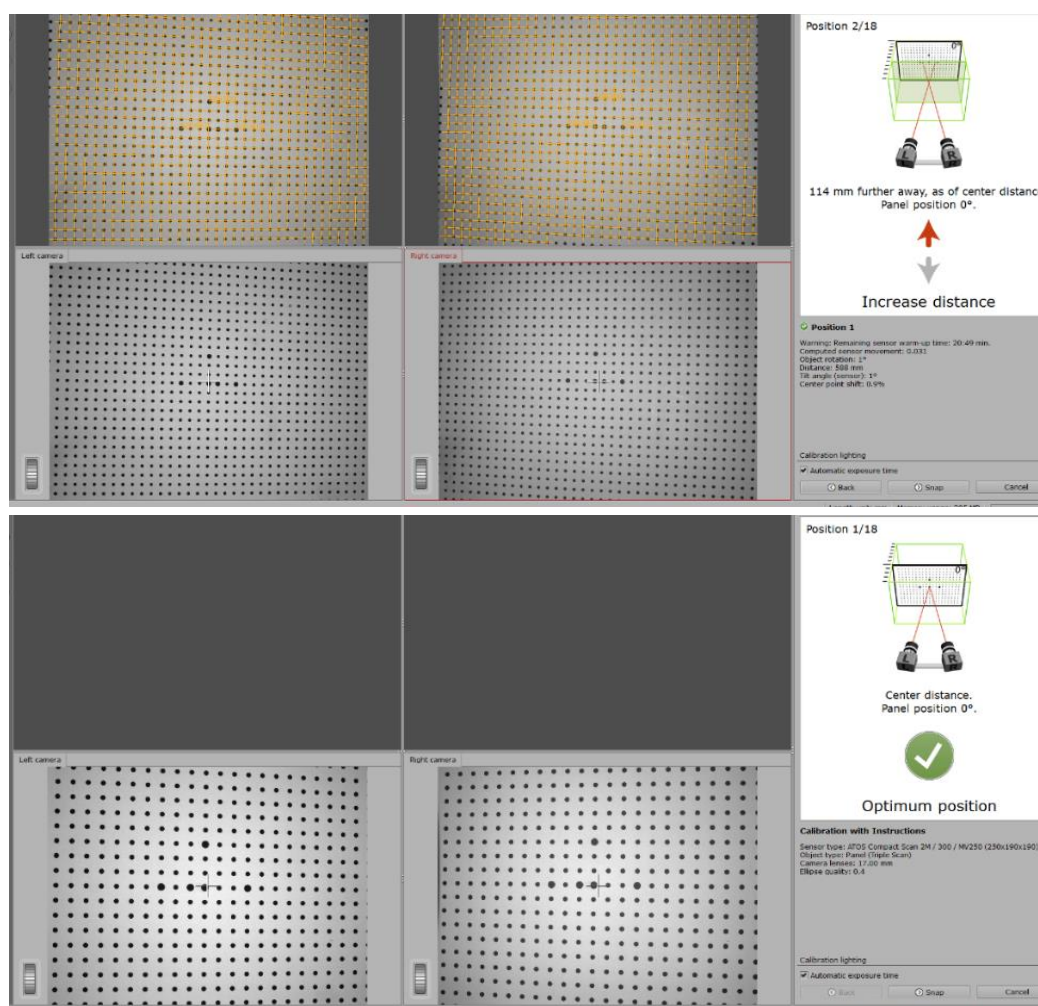
Značná část problému zkreslení obrazu byla způsobena použitým typem obrazového snímače kamer, kdy CMOS senzor nedokázal dostatečně přesně zachytit dynamické děje a docházelo k již zmíněnému problému Rolling Shutter. Celý obraz byl deformován vlivem dynamicky se měnícího pohybu a z kulatých referenčních bodů se stávaly elipsy. K jak velké deformaci docházelo je patrné z obr. 57, kdy byl proveden výstřižek stejného místa ze dvou po sobě následujících snímků.



Obr. 57 Pohled na deformace obrazu dvou po sobě následujících snímků.

Snímání se v laboratorních podmínkách sice podařilo zprovoznit, GoPro kamery však nebyly primárně vyvíjeny k fotogrammetrickému použití. Kamery GoPro standardně používají širokoúhlou pevnou čočku a případné změny režimů jsou prováděny pouze pomocí softwaru. Podle zvoleného režimu natáčení se velikost obrazu elektronicky ořízne přesně tak, aby odpovídal požadavku na vybraný režim. Způsob tohoto provedení vnáší částečné zkreslení i do zvoleného formátu Linear. Přestože jsou kamery dodatečně kalibrovány, vznikají zde nepřesnosti, které jsou se zvětšující se vzdáleností od středu markantnější.

Celkově se kamery ukázaly být nepříliš vhodnou volbou pro tento typ použití, důvodů je vícero. Program GOM Correlate, používaný pro vyhodnocování nasnímaných dat, je primárně vyvinut pro použití s kamerami stejnojmenného výrobce. Je sice možné pracovat i s jinými kamerami, není zde však dostatečná podpora. Zpracování dat a podpora jiných kamer je stále v procesu vývoje, tudíž lze očekávat zlepšení. V neposlední řadě je to proces kalibrace, kde kvůli absenci síťového propojení je výsledek kalibrace znám až zpětně. Tento postup je značně časově náročný a nejednoznačný, proto se zákonitě musí projevit v kvalitě kalibrace. Ideálním řešením by byla podobná kalibrace jako v případě skenovacího zařízení ATOS Compact Scan. Software si průběh kalibrace sám řídí, uživatel sleduje přímo na monitoru aktuální stav kalibrace a vykonává zadané pokyny. Příkladem může být kalibrace na obr. 58. V případě, že se skener nachází mimo ideální polohu, je obsluha vyzvána ke korekci podle zobrazených pokynů na displeji.



Obr. 58 Postup kalibrace 3D skeneru a pokyny pro jeho obsluhu.

Všechna měření byla uskutečněna pouze s velikostí nekódovaných referenčních bodů 5 mm. Pokus o použití větší velikosti nekódovaných referenčních bodů o velikostech 8 mm a 12 mm a ověření vlivu velikosti bodů na kvalitu snímání bodů se bohužel nemohlo uskutečnit, neboť navrhované body nebyly v laboratoři k dispozici.

Navržená měřicí sestava v případě intuitivnější kalibrace představuje velký potenciál pro použití i v jiných aplikacích a odvětvích mimo snímání jezdce. Příkladem může být požadavek na měření dynamiky hydraulického ramene kolového nakladače v projektu Výzkumu a vývoje elektrického pohonu kolového nakladače (TAČR-FW01010156), obr. 59. Rameno bylo nutné komplikovaně osazovat lineárními snímači a celkově se jednalo o velmi zdoluhavý proces včetně vyhodnocení dat. V případě použití navržené měřicí soustavy by pouze stačilo nalepit referenční body, případně zaměřit jejich polohu, pokud by byly kamery dostatečně kalibrovány na daný měřicí objem.



Obr. 59 Elektrický kolový nakladač Dapper 5000.

ZÁVĚR

Předmětem této diplomové práce bylo navrhnout a realizovat měřicí zařízení upevněné k rámu motocyklu a umožňující zaznamenávat pohyby jezdce během jízdy v čase. Postupným naplňováním vytyčených cílů následně zmapovat celý proces od pořízení záznamu videa po vytvoření simulace v multi-body programu.

Na úvod byla zpracována stručná rešerše, věnující se popisu fotogrammetrie, jízdní dynamice motocyklu a použitých technologií během realizace praktické části této diplomové práce.

Praktická část už byla věnována samotné realizaci. Pro fixaci vybraných kamer byl nejdříve zkonstruován nosný rám kamer, uchycen byl k zadní části rámu motocyklu, aby bylo možné snímat pohyby jezdce zezadu pomocí kamer. Ke snímání polohy jezdce byly vybrány pouze referenční body nalepené na přilbě a páteřovém chrániči. Následně byla provedena kalibrace kamer nutná k získání prostorových souřadnic použitých referenčních bodů a kompenzaci zkresleného obrazu kamer vzniklého použitým typem čočky.

Na základě navrhnuté měřicí sestavy bylo uskutečněno několik laboratorních měření s cílem ověřit správnost kalibrace a zjistit dosahovanou úroveň přesnosti při statickém měření. Následovalo několik měření v praxi, první se uskutečnila v areálu Fakulty strojního inženýrství a další v areálu Brněnského veletržního výstaviště. Provedená měření odhalila nedostatky v použitých kamerách a nedostatečnou tuhost nosného rámu kamer. Vlivem použitého typu obrazového snímače v kamerách docházelo ke zkreslování obrazu zvaného Rolling Shutter. Měření s jinými kamerami bohužel nebylo realizováno s ohledem k vysokým nákladům na pořízení profesionální dvojice kamer.

Součástí praktické části byla také práce s 3D skenerem, který byl použit pro doplnění stávajícího 3D modelu stroje, aby odpovídal aktuálnímu stavu motocyklu.

Zpracování nasnímaných dat probíhalo v programu GOM Correlate, jehož výstupem byly prostorové souřadnice jednotlivých referenčních bodů v čase. V dalším kroku byly souřadnice ručně upraveny a následně vloženy do programu MSC Adams View, v jehož prostředí byla realizována simulace. Nosným prvkem simulace byl multi-body model motocyklu vytvořený na základě předchozí diplomové práce.

Námětem pro budoucí kvalifikační práce může být například použití kamer již na profesionální úrovni, případně automatizace procesu kalibrace.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] MARŠÍK, Zbyněk. Fotogrammetrie. III. díl, Základy letecké fotografie a fotointerpretace. Vydání první. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1983. 56 stran
- [2] Lacquered portable azimuth circle, Brunner Paris, 19th century. Antiques-delaval.com [online]. [cit. 2021-5-02]. Dostupné z: <https://www.antiques-delaval.com/en/items-sold/700-theodolite-bronze-brunner-paris-19th-century.html>
- [3] SCHENK, T. Introduction to Photogrammetry. Mat.uc.pt/ [online]. [cit. 2021-5-02]. Dostupné z: <http://www.mat.uc.pt/~gil/downloads/IntroPhoto.pdf>
- [4] LUHMANN, T., et al. Close Range Photogrammetry: Principles, techniques and applications. Dunbeath, Caithness KW6 6EG, Scotland, UK: Whittles Publishing, 2011. Analytical methods, s. 201-315. ISBN 978-184995-057-2.
- [5] PAVELKA, Karel. FOTOGRAMMETRIE 10. Vyd. 2. přeprac. Vydavatelství ČVUT, 2003. 191 s. ISBN 80-01-02649-3.
- [6] LUHMANN, Thomas. Close range photogrammetry: principles, techniques and applications. Dunbeath: Whittles Publishing, 2011. ISBN 978-184995-057-2.
- [7] LINDER, W. Digital Photogrammetry: Theory and Applications. Berlin: Springer-Verlag, 2013. 191 s. ISBN 978-3-662-06727-7.
- [8] HANZL, Vlastimil. Fotogrammetrie, teoretické základy fotogrammetrie; studijní opory. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2006, [online]. [cit. 2021-4-25]. Dostupné z: http://fast.darmy.net/opory%20-%20III%20Bc/GE15-Fotogrammetrie_I--M01-Teoreticke_zaklady_fotogrammetrie.pdf
- [9] Fotogrammetrie: Teoretické základy fotogrammetrie. [online]. [cit. 2021-4-25]. Dostupné z: http://fast.darmy.net/opory%20-%20III%20Bc/GE15-Fotogrammetrie_I--M01-Teoreticke_zaklady_fotogrammetrie.pdf
- [10] RICHTER, Miloslav. 3D techniky počítačového vidění: učební texty. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2017. [online], [cit. 2021-3-21]. Dostupné z: https://www.uamt.feec.vutbr.cz/~richter/vyuka/1718_POV/POV_3D_17.pdf
- [11] Kolektiv. FOTOGRAMMETRIE 1, 2: Praktická cvičení. Praha: ČVUT, 2007. 163 s.
- [12] REMONDINO, Fabio a Clive FRASER. Digital camera calibration methods: Considerations and comparisons, International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 36, No. 5, pp. 266–272, 2006.
- [13] CIBULKA, Miloš. Fotogrammetrie, Laserové skenování. Brno: Mendelova univerzita v Brně, 2018, [online]. [cit. 2021-4-25]. Dostupné z: http://uhulag.mendelu.cz/files/pagesdata/cz/geodezie/geodezie_2018/fotogrammetrie.pdf
- [14] FISCHER, Jan. Optoelektronické snímače – fotodiodová pole, obrazové senzory CMOS. Moodle.fel.cvut.cz [online]. [cit. 2021-3-21]. Dostupné z:

https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/76815/mod_resource/content/1/A0M38OSE_2015_Pred_Obr_Senzory_CMOS_1.pdf

- [15] KOSOŮVÁ, Petra. Numerical Methods of Image Analysis: učební texty. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. [online], [cit. 2021-4-08].
- [16] CCD and CMOS sensor technology: Technical white paper [online]. AXIS Communications AB, 2010 [cit. 2021-3-22]. Dostupné z: https://www.axis.com/files/whitepaper/wp_ccd_cmos_40722_en_1010_lo.pdf
- [17] Introduction to CCD Imaging. Gxccd.com [online]. [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: <https://www.gxccd.com/art?id=303&lang=409>
- [18] ALLÉ, P, E WENGER, S DAHAOUI, D SCHANIEL a C LECOMTE. Comparison of CCD, CMOS and Hybrid Pixel x-ray detectors: detection principle and data quality. Physica Scripta [online]. 2016, 91(6), 063001 [cit. 2021-5-03]. ISSN 0031-8949. Dostupné z: <https://iopscience-iop-org.ezproxy.lib.vutbr.cz/article/10.1088/0031-8949/91/6/063001>
- [19] SLANGEN, Pierre a Pascal PICART. Basic principles of image sensors: Introduction. Optique-ingenieur.org [online]. [cit. 2021-4-18]. Dostupné z: http://www.optique-ingenieur.org/en/courses/OPI_ang_M05_C06/co/Grain_OPI_ang_M05_C06.html
- [20] PAUL, Johnathan. Rolling Shutter vs Global Shutter: What's the difference? Premiumbeat.com [online]. [cit. 2021-3-20]. Dostupné z: <https://www.premiumbeat.com/blog/know-the-basics-of-global-shutter-vs-rolling-shutter/>
- [21] ČEPOVÁ, Lenka a Lenka PETŘKOVSKÁ. Legislativa ve strojírenské metrologii a přesné měření 3D ploch: studijní opora. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2011. ISBN 978-80-248-2514-4.
- [22] BELLOCCHIO, Francesco. 3D Surface Reconstruction: Multi-Scale Hierarchical Approaches [online]. New York: Springer, c2013, s. 21-42 [cit. 2015-02-17]. ISBN 978-146-1456-322. Dostupné z: <http://link.springer.com/book/10.1007%2F978-1-4614-5632-2>
- [23] ŠIMONÍK, Martin. Digitalizace - její princip a rozdělení. MMspektrum [online]. 2004 [cit. 2021-05-15]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/digitalizace-její-princip-arozdeleni.html>
- [24] ČERMÁK, J. Metody 3D skenování objektů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 44 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Tomáš Marada, Ph.D.
- [25] GOTHİ, S.S. a P. RASTOGI. Fringe Projection Techniques: Whither we are?. Optics and lasers in engineering [online]. 2010, roč. 48, č. 2, s. 133-140 [cit. 2021-05-05]. ISSN 0143-8166. Dostupné z: <http://infoscience.epfl.ch/record/140745/files/OLEN.pdf>
- [26] 3D Scanners: A GUIDE TO 3D SCANNER TECHNOLOGY. 3dsystems.com [online]. [cit. 2021-4-28]. Dostupné z: <https://www.3dsystems.com/3d-scanner/scanner-guide>
- [27] Mendricky R., Analysis of measurement accuracy of contactless 3D optical scanners, Science Journal, 2015, 711-716.

- [28] COSSALTER, Vittore. Motorcycle dynamics. 2nd English ed. [S.l.: Lulu], c2006. ISBN 978-1-4303-0861-4.
- [29] VLK, František. Teorie a konstrukce motocyklů. 1. vyd. Brno: František Vlk, 2004, 355 s. ISBN 80-239-1601-7.
- [30] Technika motocyklu - 8. část - podvozek. Motorkari.cz [online]. [cit. 2021-3-20]. Dostupné z: <https://www.motorkari.cz/clanky/jak-na-to/technika-motocyklu-8.-cast-podvozek-3456.html>
- [31] Full Control: ...everything you need to become a good driver [online]. Norsk Motorcykkel Union [cit. 2021-4-15]. Dostupné z: https://motorcycleminds.org/virtuallibrary/ridersafety/Full%20Control_2013.pdf
- [32] Sequenzia, G.; Oliveri, S.M.; Fatuzzo, G.; Calì, M. An advanced multibody model for evaluating rider's influence on motorcycle dynamics. Proc. Inst. Mech. Eng. Part K J. Multi-Body Dyn. 2015, 229, 193–207
- [33] 2015 KTM RC 390 – First Look Review. Ridermagazine.com [online]. [cit. 2021-5-02]. Dostupné z: <https://ridermagazine.com/wp-content/uploads/2014/09/KTM-RC-390-web.jpg>
- [34] KTM RC 390. Motorkari.cz [online]. [cit. 2021-5-02]. Dostupné z: <https://www.motorkari.cz/motokatalog/ktm/ktm-rc-390.html>
- [35] 2015 KTM RC 390. Topspeed.com [online]. [cit. 2021-5-02]. Dostupné z: <https://www.topspeed.com/motorcycles/motorcycle-reviews/ktm/2015-ktm-rc-390-ar166676.html>
- [36] GOPRO HERO 5 SESSION. Zarasports.co [online]. [cit. 2021-4-28]. Dostupné z: <https://www.zarasports.co/other-accessories/gopro-hero-5-session/>
- [37] HERO5 Session: USER MANUAL [online]. [cit. 2021-4-28]. Dostupné z: https://gopro.com/content/dam/help/hero5-session/manuals/HERO5Session_UM_ENG_REVD_WEB.pdf
- [38] GoPro Hero5 Session specs. Cnet.com [online]. [cit. 2021-4-28]. Dostupné z: <https://www.cnet.com/products/gopro-hero5-session/specs/>
- [39] Andy. What is GoPro Field of View (FOV)?, [online]. Project GoPro, 2019 [cit. 2021-5-07]. Dostupné z: <https://projectgo.pro/gopro-field-of-view/>
- [40] WHITLEY Thomas. Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) for Documenting and Interpreting Historical Archaeological Sites: Part II—Return of the Drones [online]. In: researchgate.net. January 2015 [cit. 2021-4-15]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/307205577_Unmanned_Aerial_Vehicles_UAVs_for_Documenting_and_Interpreting_Historical_Archaeological_Sites_Part_II-Return_of_the_Drones/stats
- [41] GOM mbH, ATOS User Manual – Hardware, Germany, [online]. [cit. 2021-5-07]. Dostupný na [www:http://docshare01.docshare.tips/files/11936/119363016.pdf](http://docshare01.docshare.tips/files/11936/119363016.pdf)

- [42] GOM Correlate Professional: V8 SR1 Manual Basic [online]. Braunschweig, Germany: GOM mbH, 2015 [cit. 2021-5-07]. Dostupné z: http://213.8.45.88/PDF/gom_correlate_prof_basic_v8.pdf
- [43] ATOS Compact Scan. Mcae.cz [online]. [cit. 2021-5-07]. Dostupné z: <https://www.mcae.cz/produkty/atos-compact-scan/>
- [44] ATOS Compact Scan: Mobile 3D scanner for a wide range of applications. Gom.com [online]. [cit. 2021-5-07]. Dostupné z: <https://www.gom.com/en/products/3d-scanning/atos-compact-scan>
- [45] Adams: The Gold Standard in MultiBody Dynamics Simulation. Mscsoftware.com [online]. [cit. 2021-4-18]. Dostupné z: <https://www.mscsoftware.com/product/adams>
- [46] TOBIÁŠ, Martin. Analýza měřených dynamických stavů motocyklů. [online]. Brno, 2019 [cit. 2019-04-24]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/116752>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí práce Petr Porteš.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

c	[m]	Hlavní vzdálenost
$F_{\text{odstř}}$	[N]	Odstředivá síla
G	[N]	Tíhová síla
g	$[m \cdot s^{-2}]$	Tíhové zrychlení
L	[m]	Vzdálenost objektu
m	[N]	Hmotnost
M_{GX}	$[N \cdot m]$	Gyroskopický moment
m_m	[-]	Měřítka fotografie
R	[m]	Poloměr zatačky
v	$[m \cdot s^{-1}]$	Rychlost
X	[m]	Rovina objektu
x'	[m]	Vzdálenost
α	$[^\circ]$	Úhel směrové odchylky
γ	$[^\circ]$	Úhel naklopení
Δt	[s]	změna času
ΔV	$[N \cdot s]$	Impuls síly
ω_y	$[\text{rad} \cdot s^{-1}]$	Úhlová rychlost v ose y
ω_z	$[\text{rad} \cdot s^{-1}]$	Úhlová rychlost v ose z
J	$[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	Moment setrvačnosti

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 První fototeodolit byl sestaven v roce 1859 [2].	12
Obr. 2 Princip dírkového modelu komory [6].	14
Obr. 3 Vnější orientace objektivu kamery [6].	14
Obr. 4 Princip pozemní stereofotogrammetrie [10].	15
Obr. 5 Princip průsekové fotogrammetrie [5].	15
Obr. 6 CCD snímač nalevo, CMOS snímač napravo [16].	18
Obr. 7 Způsob zpracování elektronů v CCD snímači [16].	18
Obr. 8 a) bez bloomingu b) vertikální blooming c) horizontální blooming [19].	19
Obr. 9 Princip snímání obrazu typu Rolling Shutter [14].	20
Obr. 10 Porovnání typu Global Shutter (nahore) a Rolling Shutter (dole) [20].	20
Obr. 11 Rozdělení metod 3D skenování [24].	21
Obr. 12 Schéma motocyklu s vyznačenými osy a terminologií rotací [29].	23
Obr. 13 Směrové chování motocyklu při působení boční síly [28].	24
Obr. 14 Úhel směrové úchyly motocyklu v závislosti na délce rozvoru [28].	24
Obr. 15 Směr klopení rotujícího kola při natočení kola kolem osy z [29].	25
Obr. 16 Rovnováha sil při průjezdu zatáčkou [29].	27
Obr. 17 Úhel naklonění γ nutný k projetí zatáčky [29].	28
Obr. 18 Jízdní styly nutné k naklonění o úhel γ [29].	28
Obr. 19 KTM RC 390 2015 [33].	31
Obr. 20 Konstrukce a uchycení přídatného rámu ke stroji.	33
Obr. 21 GoPro HERO 5 Session včetně ochranného krytu s držákem [36].	33
Obr. 22 Jednotlivé režimy podle úhlu záběru [39].	34
Obr. 23 Způsob vytvoření režimu Linear [39].	35
Obr. 24 Princip vzniku distorze i po úpravě režimů [40].	35
Obr. 25 Pozorované body pomocí kamer.	36
Obr. 26 Pohled na způsob uchycení kamer.	36
Obr. 27 Porovnání pohledu pravé kamery (horní snímek) a levé kamery (spodní snímek). ...	37
Obr. 28 Prostředky k dálkovému ovládní kamer. Vlevo GoPro Remote control, vpravo aplikace GoPro Quik.	38
Obr. 29 Průběh kalibrace v laboratoři ÚADI.	39
Obr. 30 Schéma jednotlivých kalibračních kroků včetně jejich popisů.	40
Obr. 31 Výstupní data z provedené kalibrace GoPro kamer.	41
Obr. 32 Plastový skelet k uchycení laserového ukazovátka.	42
Obr. 33 Neúspěšný proces kalibrace kamer.	42
Obr. 34 Princip vytvoření souřadného systému 3-2-1 [42].	43
Obr. 35 Původní varianta rozestavení souřadného systému.	44
Obr. 36 Varianta č.2 rozestavení souřadného systému.	44
Obr. 37 GOM ATOS Compact Scan 2M [43].	45
Obr. 38 Dodatečně skenovaná část motocyklu	46
Obr. 39. Průběh skenovacích prací na motocyklu.	46
Obr. 40 Pohled na skenované části: a) původní rozložení referenčních prvků, b) nové rozložení referenčních prvků.	47
Obr. 41 Porovnání vzdálenosti posunu v programu Correlate s realizovaným posunem.	48
Obr. 42 Zjištěná vzdálenost z kamer GoPro (snímek nahore) a vzdálenost z naskenovaného 3D modelu motocyklu (snímek dole).	49
Obr. 43 Průběh testování pohybu přilby v laboratořích ÚADI.	50
Obr. 44 Snímek z průběhu testování zobrazující maximální snímatelné natočení přilby.	50

Obr. 45 Ukázka prováděných jízdních situací.....	51
Obr. 46 Pohled na páteřový chránič s umístěnými referenčními body.	52
Obr. 47 Snímek z průběhu měření pohybu přilby.	53
Obr. 48 Pohled na synchronizační bod vytvořený bleskem fotoaparátu.	54
Obr. 49 Prostředí programu GOM Correlate a průběh zpracování.	55
Obr. 50 Výsledný report z provedení měření pohybu přilby.....	56
Obr. 51 Výřez z tabulky vyhodnocených prostorových souřadnic jednotlivých bodů.	57
Obr. 52 Vytvořené multi-body modely v softwaru ADAMS.....	57
Obr. 53 Vyhodnocení vzájemných posunů bodů při samostatném pohybu přilby.....	58
Obr. 54 Vyhodnocení vzájemných posunů bodů během zatáčení.....	58
Obr. 55 Vyhodnocení referenčních bodů přilby na zcela odlišných pozicích.....	60
Obr. 56 Vyhodnocení referenčních bodů mimo původní lokaci na vedlejších objektech a pozicích jezdce.	61
Obr. 57 Pohled na deformace obrazu dvou po sobě následujících snímků.	61
Obr. 58 Postup kalibrace 3D skeneru a pokyny pro jeho obsluhu.	62
Obr. 59 Elektrický kolový nakladač Dapper 5000.	63

SEZNAM PŘÍLOH

A. Záznam zpracovaného pohybu přilby